

**Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100 % de pavimento asfáltico reciclado.**

**Presentado por:**

**Rodolfo Arias Fuya**

**Beyer Yesid Rivera Camacho**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Especialista en Ingeniería de Pavimentos**

**Director**

**Mario Alexander Castañeda López**

**Ingeniero Civil**

**Universidad Católica de Colombia**

**Facultad de Ingeniería**

**Especialización en Ingeniería de Pavimentos**

**Bogotá D.C.**

**2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

Director de Investigación

---

Asesor Metodológico

---

Jurado

Bogotá D.C., 8 de noviembre de 2019



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**  
Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:

Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas



### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>I. TEMA.....</b>	<b>10</b>
<b>II. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>III. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>IV. OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
A. <i>Objetivo general.....</i>	13
B. <i>Objetivos específicos.....</i>	13
<b>V. ALCANCES Y LIMITACIONES.....</b>	<b>14</b>
A. <i>Alcances.....</i>	14
B. <i>Limitaciones.....</i>	14
<b>VI. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
A. <i>Reciclado de pavimento asfáltico.....</i>	15
B. <i>Módulo de resiliencia en mezclas asfálticas.....</i>	17
C. <i>Historia en el mundo.....</i>	20
D. <i>Historia en Colombia.....</i>	21
E. <i>Normativa Colombiana.....</i>	24
1) <i>Reciclado de pavimento asfáltico en frío en lugar empleando ligantes bituminosos ART. 461 – 13.....</i>	24
2) <i>Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica –IDU.....</i>	24
<b>VII.METODOLOGÍA.....</b>	<b>26</b>
A. <i>Investigación y análisis de la información.....</i>	26
1) <i>Programa experimental.....</i>	27
2) <i>Caracterización física del material utilizado (RAP).....</i>	28
<b>VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL (RAP).....</b>	<b>37</b>
A. <i>Resultados y análisis de laboratorios de caracterización física del (RAP).....</i>	37
B. <i>Ensayos mecánicos a la mezcla de reciclado de pavimento asfáltico (RAP) con bitumen crl-1 y cemento hidráulico, obtención y análisis de resultados.....</i>	46
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>70</b>

## LISTADO DE TABLAS

<b>Tabla 1. Dosificación de la mezcla en frío con RAP .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 2. Franja granulométrica de los agregados reciclados en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos (Tabla INVIAS 461-1).....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 3. Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente (Desgaste Máquina de los Ángeles).....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 4. Granulometría de las muestras de ensayo .....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 5. Granulometría para el ensayo de Micro – Deval. ....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 6. Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente (Resistencia mecánica por el método 10 por ciento de finos). ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 7. Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente (Equivalente de Arena).....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 8. Granulometría del material para el proyecto (RAP) .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 9. Resultados desgaste máquina de los Ángeles. ....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 10. Resultados ensayo Micro - Deval. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 11. Resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10 por ciento de finos. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 12. Resultado equivalente de arena. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 13. Extracción de asfalto Norma: I.N.V.: E-732 E-782 .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 14. Resultados obtenidos de la Resistencia a la tracción indirecta en el laboratorio (RTI) .....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 15. Resultados obtenidos de la Resistencia a la tracción indirecta (RTI) en MPa. ....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 16. Promedio de resultados .....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 17. Resumen de resultados de módulos resiliente .....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 18. Resumen de resultados de deformaciones recuperables .....</b>	<b>54</b>

## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1. Pulso de carga "haversine" y deformaciones en mezclas asfálticas [9].</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2. Representación gráfica de la deformación que sufre la mezcla asfáltica durante la aplicación de carga [9].</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3. Granulometría (RAP).</b>	<b>39</b>
<b>Figura 4. Granulometría extracción de asfalto.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 5. Resistencia a la tracción indirecta Vs porcentajes de emulsión asfáltica.</b>	<b>51</b>
<b>Figura 6. Resistencia a la tracción indirecta Vs tiempo de curado.</b>	<b>52</b>
<b>Figura 7. Módulo resiliente Vs porcentaje de emulsión asfáltica para un tiempo de curado de 14 días.</b>	<b>58</b>
<b>Figura 8. Módulo resiliente Vs porcentaje de emulsión asfáltica para un tiempo de curado de 28 días.</b>	<b>59</b>
<b>Figura 9. Módulo resiliente Vs tiempo de curado de la mezcla.</b>	<b>60</b>
<b>Figura 10. Comparativo de resultados ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) Vs Módulo Resiliente (MR).</b>	<b>61</b>
<b>Figura 11. Comparativo de resultados ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) Vs Módulo Resiliente (MR) mediante la pendiente de cada una de las rectas.</b>	<b>62</b>
<b>Figura 12. Determinación de la variación del Módulo Resiliente de acuerdo a una variación determinada de la Resistencia a la Tracción Indirecta.</b>	<b>65</b>

## **LISTADO DE ANEXOS**

- **ANEXO 1. RESULTADOS ENSAYO RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA (RTI).**
- **ANEXO 2. RESULTADOS ENSAYO MODULO RESILIENTE MR A LOS 14 DIAS.**
- **ANEXO 2. RESULTADOS ENSAYO MODULO RESILIENTE MR A LOS 28 DIAS.**

## RESUMEN

En Colombia los materiales utilizados para mejorar la transitabilidad en las vías de bajos volúmenes de circulación de vehículos, en muchos de los casos no son lo suficientemente eficientes para presentar una superficie de rodadura duradera que pueda prestar un servicio moderadamente eficiente a los usuarios de estas vías. Se presentan dentro del mercado académico estudios e investigación donde se exponen diferentes alternativas que pretenden mejorar la calidad en el servicio de estas vías para beneficio económico y de desarrollo de las diferentes regiones. De esta manera se proyecta realizar un estudio teniendo en cuenta materiales que provienen del reciclado del pavimento asfáltico, mediante la caracterización y el ensayo del material reciclado para mezclas asfálticas en frío, con esto se pretende encontrar resultados que puedan generar alternativas de pavimentación económicas, duraderas, favorables con el medio ambiente y con un mejor nivel de servicio que pueda ser utilizado por las diferentes entidades los proyectos de mejoramiento y mantenimiento de vías, se espera que dentro de la realización de este estudio y los diferentes ensayos de laboratorio se encuentre una alternativa que pueda mitigar y mejorar los problemas que se presentan las vías de bajo nivel de tránsito y con esto mejorar las condiciones sociales en las diferentes regiones del país.

Como base de la investigación se toman las normas INVIAS del 2013, realizando diferentes ensayos de caracterización del material reciclado de pavimento asfáltico (RAP), y los ensayos mecánicos para realizar el análisis del comportamiento de la mezcla con los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica. Para la realización de la mezcla se usó 100 por ciento de RAP, con un porcentaje constante de cemento hidráulico del 12,5 por ciento y una variable en el porcentaje de emulsión asfáltica entre el 3 y 9 por ciento.

Se propone una metodología de dosificación de 100 por ciento de RAP con un porcentaje constante de cemento hidráulico del 12,5 por ciento, y 3 por ciento emulsión asfáltica, siendo éste el porcentaje óptimo que satisface los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la tracción indirecta y de módulo resiliente.



**Palabras claves:** RAP (Reciclado de Pavimento Asfáltico), mezcla de pavimento en frío, vías de bajos volúmenes de tránsito, resiliencia en pavimentos.

## **ABSTRACT**

In Colombia, the materials used to improve passability on low-volume vehicle traffic lanes, in many cases are not efficient enough to present a durable rolling surface that can provide moderately efficient service to users of these roads. Studies and research are presented within the academic market where different alternatives are presented with the aim of improve the quality of service of these routes for economic and development benefit of the different regions. In this way, a study is planned taking into account materials that come from the recycling of the asphalt pavement, through the characterization and testing of the recycled material for cold asphalt mixtures, with this it is intended to find results that can generate economic, lasting paving alternatives and with a better level of service that can be used by the different entities the projects of improvement and maintenance of roads, it is expected that within the realization of this study and the different laboratory tests an alternative is found that can mitigate and improve the problems that are presented with low traffic routes and with this improve social conditions in different regions of the country.

The INVIAS standards of 2013 are taken as the basis of the investigation, carrying out different characterization tests of the recycled asphalt pavement material (RAP), and the mechanical tests to analyze the behavior of the mixture with the different percentages of asphalt emulsion. For the realization of the mixture, 100 percent RAP was used, with a constant percentage of hydraulic cement of 12.5 percent and a variable in the percentage of asphalt emulsion between 3 and 9 percent.

A dosage methodology of 100 percent of RAP is proposed with a constant percentage of hydraulic cement of 12.5 percent, and 3 percent asphalt emulsion, this being the optimal percentage that satisfies the results obtained from resistance tests indirect traction and resilient module.

**Keywords:** RAP (Asphalt Pavement Recycling), cold pavement mixing, low traffic roads, pavement resilience.

## **I. TEMA**

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO MECÁNICO DE MEZCLAS EN FRÍO PARA VÍAS DE BAJO VOLUMEN DE TRANSITO DE COLOMBIA UTILIZANDO 100 % DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO.

## **II. INTRODUCCIÓN**

Las vías son las conectantes que abarcan el desarrollo económico, social y turístico de las diferentes regiones de un país, en Colombia la red terciaria es la de mayor longitud del país correspondiendo al 67 por ciento de la malla vial total de Colombia, por otra parte, el 19 por ciento corresponde a red secundaria a cargo de los departamentos, 8 por ciento es Red Nacional a cargo de la Nación y 6 por ciento son vías privadas. Actualmente la red terciaria tiene una extensión de 142.284 kilómetros, de los cuales 27.577 están a cargo del INVIAS, 100.748 a cargo de los municipios y 13.959 a cargo de los departamentos [1].

La delegación de la gestión de la red terciaria a los entes territoriales (EE.TT) acarrió una problemática mayor, como fue la de la incapacidad técnica de los entes territoriales para trazar planes viales de largo plazo que rehabilitaran la red, así como la dificultad para soportar técnicamente la gestión de proyectos viales en los ámbitos legales, financieros, ambientales y propios de la ingeniería.

Las causas de la desigualdad en la infraestructura vial tienen una relación directa con la presencia del conflicto armado. Entiéndase la red terciaria como el canal que comunica las cabeceras municipales con sus corregimientos. En ausencia de estos canales se tiene una débil presencia del Estado y una inexistencia de mercados. Este es el escenario actual del país que constituye un reto estructural para el posconflicto en el tema de red vial nacional, en especial de red terciaria y secundaria. Vale la pena aclarar que la deficiente infraestructura de transporte no es un problema que se origina durante el conflicto armado, sino que incluso llega a ser una razón por la cual se origina el conflicto. No es una casualidad que Ibáñez (2016) mencione que los problemas agrarios y de tierras “no son

problemas nuevos ni surgieron durante el conflicto actual. Son el resultado de décadas de incapacidad del Estado y falta de voluntad política.” (Portafolio, 2016).

En red terciaria, se ha iniciado una transformación en la institucionalidad. Durante el gobierno del presidente Santos se han invertido 3,1 billones de pesos entre el 2010 y 2016, y se espera que en el marco del posconflicto se logren descongelar 1,5 billones de pesos adicionales para llegar a 4,6 billones de pesos (cerca de 1,2 por ciento del PIB), ello sin contar las inversiones realizadas por los gobernadores y alcaldes durante sus gobiernos [2].

Teniendo en cuenta que los recursos son limitados para atender los deterioros que se presentan en estas vías, se buscan alternativas económicamente viables que puedan suplir las necesidades más inherentes referentes al sostenimiento de estos corredores, en el afán de generar alternativas para mejorar el nivel de servicio y durabilidad de estas vías que pueda causar mejoras sociales a las diferentes regiones del territorio nacional, se pretende efectuar estudios a materiales que puedan presentar alternativas de mezclas asfálticas duraderas y económicas que puedan reducir el mantenimiento acostumbrado que se realiza a los diferentes tramos en estos tipos de vía, mediante la realización de los diferentes ensayos y caracterización de materiales asfálticos reciclados obtenido por la actividad de fresado, se proyecta evaluar una alternativa de mezcla asfáltica en frío que pueda ser opción para mejorar los niveles de servicio de vías de bajos volúmenes de tránsito, que sea económica y duraderamente viable para la aplicación en las diferentes regiones del país.

Se espera que el estudio ofrezca herramientas para su implementación en el diseño de vías de bajo tráfico, para crear una alternativa que pueda generar un mayor desarrollo en las regiones del país y así disminuir los problemas económicos, de comunicación, transporte y traslado de productos de las regiones afectadas por el deterioro de las vías conectantes con las diferentes municipios y ciudades del territorio nacional.

### **III. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

El acceso a la infraestructura vial y transporte más amplio, es un importante facilitador de desarrollo económico y social [3]. Por lo tanto, es indispensable la creación y mantenimiento de las carreteras; aunque la construcción de esto genera cambios y problemas ambientales los cuales se deben disminuir. Por lo anterior, se estudia la reutilización del pavimento con el fin de aumentar la sostenibilidad del medio ambiente.

Utilizar el pavimento reciclado permite cuidar el medio ambiente, debido a la disminución del material de extracción y a la disminución de residuos. Teniendo en cuenta que las obras de ingeniería que más contaminan son las vías, se debe mejorar e incrementar el uso de esta técnica. De acuerdo con Chiu et.al (2008), el uso de RAP en mezclas asfálticas se adhiere a la exigencia de sostenibilidad y soluciones en pavimentos porque es ambientalmente amigable y rentable. Al agregar RAP a las mezclas, reduce el impacto ambiental de la producción en un 23% [4].

Relacionando lo anterior, se pretende realizar la investigación acerca de los pavimentos reciclados, determinando ¿Qué cambios en el comportamiento mecánicos se presentan en mezclas con 100 por ciento de RAP y cemento como filler, como función del porcentaje de emulsión asfáltica (EA)?.

## **IV. OBJETIVOS**

### ***A. Objetivo general.***

- Evaluar el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en frío estabilizadas con emulsión asfáltica para su empleo en vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100 por ciento de pavimento asfáltico reciclado y cemento Portland como filler.

### ***B. Objetivos específicos.***

- Proponer una metodología de dosificación para mezclas de agregados reciclados (RAP) estabilizadas con emulsión asfáltica (EA).
- Realizar la caracterización física del material granular reciclado.
- Analizar los cambios de resistencia a la tracción indirecta (RTI) de las mezclas propuestas como función del porcentaje de emulsión asfáltica (EA).
- Estudiar la influencia del porcentaje de emulsión asfáltica (EA) en los valores de módulo resiliente (MR) de las mezclas propuestas.
- Estudiar la influencia del empleo de cemento Portland como filler en los valores de Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) y de módulo resiliente (MR) para las mezclas propuestas.
- Establecer relaciones entre la resistencia a tracción indirecta y los valores de módulo de resiliencia del material.

## **V. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### ***A. Alcances.***

El proyecto, a través de análisis de ensayos de laboratorio, busca evaluar el comportamiento físico mecánico de las mezclas en frío mediante el uso de reciclado de pavimento asfáltico, así como las implicaciones de tales variaciones en el diseño de una estructura de pavimento. Así mismo se buscó proponer una metodología de diseño de mezcla.

### ***B. Limitaciones***

- Una de las limitaciones es la heterogeneidad, característica inherente de los materiales reciclados.
- Las metodologías de dosificación de mezclas de pavimentos asfáltico reciclado (RAP) son basadas únicamente en ensayos de RTI, siendo que no evalúan la resiliencia del material.
- Además de la respuesta resiliente, se hace necesario estudiar otros fenómenos como deformación permanente. Asimismo, no es evaluado el efecto de la temperatura sobre la respuesta mecánica de las mezclas estudiadas.
- La propuesta en este caso en particular solo toma en cuenta el reciclado de pavimento asfáltico (RAP), con un porcentaje de emulsión asfáltica y un porcentaje de cemento hidráulico, constante, como filler.

## VI. MARCO TEÓRICO

### *A. Reciclado de pavimento asfáltico.*

El RAP conocido como Pavimento Asfáltico Reciclado, es un material que se recupera de fresar pavimentos en reparación, reconstrucción, mantenimiento o rehabilitación que puede ser utilizado en el mantenimiento de algunas vías o en el refuerzo de capas granulares para mejorar el comportamiento de la estructura de un pavimento.

El Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP), se puede utilizar en diferentes mezclas, con diferentes tipos de materiales mejorando la capacidad de soporte de una estructura frente a las solicitaciones de tránsito que tiene una vía. En contexto es un material que se puede utilizar en la mezcla de sub-bases granulares, bases granulares, bases y sub-bases estabilizadas como también en las mezclas asfálticas, realizando la trituración y gradación adecuada que requiere cada una de estas mezclas cumpliendo con los estándares de calidad y de acuerdo a las normas y especificaciones vigentes contenidas en cada una de las entidades que regulan la y vigilan la calidad de construcción de las vías del país [5].

Al realizar un análisis de la reutilización de residuos, se ha podido establecer que cada día, dicha reutilización aumenta por la necesidad de cuidar el medio ambiente y para evitar enfermedades a la población, aunque en muchos casos se reutilizan los pavimentos por la falta de material en la zona o porque no hay lugares de desecho apropiados para este material [6].

La experiencia al utilizar el pavimento reciclado ha demostrado que se genera disminución de los costos de construcción, pero se debe realizar una evaluación económica y de servicio, entre el reciclaje frío o caliente, de acuerdo a su proceso constructivo. De acuerdo a dicha comparación, el reciclado de pavimento frío es realizado in situ, su colocación es más sencilla, lo que proporciona mayores rendimientos de tiempo y costo en la obra, respecto al reciclaje en caliente. Sin importar el tipo de reciclado, se debe tener rigurosidad en la caracterización del material, para que cumpla las exigencias de resistencia necesaria para el tránsito actual y futuro [7].



Las ventajas de trabajar el reciclado en frío es reducir costos de transporte y el impacto ambiental, por tal razón hoy en día se busca realizar un proceso a bajas temperaturas, como el reciclado en frío con emulsión. Una emulsión tiene la capacidad de llegar a la consolidación de la mezcla cumpliendo los parámetros estructurales estipulados por las normas existentes, aportando así a la reducción de costos. (Botasso, Cuattrocchio, Rebollo, Soenga, 2008) afirman que la técnica usada en la rehabilitación de pavimentos en frío, de material fresado con emulsión asfáltica, tiene ventajas como: ahorro de agregados, técnica amigable con el medio ambiente, ahorro de energía por temperaturas de mezclado, y procedimientos de bajo costo. Este proceso consigue una muy rápida cohesión permitiendo así que el firme tenga propiedades mecánicas suficientes para la apertura al tráfico en muy poco tiempo [8].

Actualmente en Colombia, de acuerdo a las normas técnicas de INVIAS, existen criterios de resistencia para la determinación del contenido óptimo de ligantes en reciclados con emulsión asfáltica, como lo indica la tabla 461-6 de la norma, en donde se exige que la resistencia de probetas curadas en seco  $R_s$  sea de mínimo 2,0 MPa, y la resistencia conservada tras curado húmedo sea de mínimo 75 por ciento. También la norma considera algunas llenantes como lo es el cemento hidráulico que complementa la acción del ligante asfáltico en cuanto a su reactividad y también la adición de material bituminoso. Si bien se conoce la resistencia mínima requerida, y se contempla la adición de emulsión asfáltica y cemento hidráulico, la normatividad no contempla los porcentajes óptimos a incorporar de tales materiales, ni tampoco las resistencias que se pueden llegar a obtener, razón por la cual, con el presente proyecto se pretende establecer la resistencia máxima que se puede llegar a obtener con el material de estudio y cuál es el contenido de emulsión asfáltica y de cemento hidráulico óptimo requerido para obtener tal resistencia.

### ***B. Módulo de resiliencia en mezclas asfálticas***

Los materiales utilizados para carreteras se encuentran sometidos a cargas de tipo dinámico de diversas magnitudes. Para tomar en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales de la estructura del pavimento, diversas investigaciones experimentales han sido llevadas a cabo dentro de los métodos de diseño mencionados anteriormente.

Hay dos tipos de deformaciones en los materiales que conforman el pavimento: la deformación resiliente o elástica, la cual es recuperable instantáneamente, y la deformación plástica, que permanece en el pavimento una vez ha cesado la acción de las cargas. Al tenerse cargas móviles en el pavimento, las deformaciones permanentes se van acumulando, reduciéndose en cada ciclo, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La mezcla llega así a un estado tal en que posee un comportamiento resiliente. El primero en reconocer la importancia de las propiedades resilientes de las estructuras de pavimento fue Francis Hveem durante la década de los cincuenta, efectuando la identificación de estas propiedades con la aparición de grietas sobre la superficie de los pavimentos, siendo éstas por la influencia de las cargas repetidas como el resultado del tráfico de los vehículos. Hveem desarrolló una prueba triaxial de carga cíclica o repetida, no obstante, no ha sido el único ensayo de este tipo.

Al trabajar con mezclas asfálticas en pruebas de carga repetida se observa que después de un cierto número de ciclos de carga el módulo llega a ser aproximadamente constante y la respuesta del material puede asumirse como elástica. Al módulo que permanece constante se le llama módulo resiliente.

En general, para la medición del módulo resiliente en laboratorio se aplica un pulso de carga haversine sobre el manto lateral de una probeta cilíndrica, y se mide la deformación axial que ésta sufre en cada ciclo de carga, como se observa en la Figura 1, Pulso de carga "haversine" y deformaciones en mezclas asfálticas. Este pulso haversine está pensado para replicar lo que ocurre en el pavimento: mientras una rueda del vehículo se encuentra a una distancia considerable de un punto en el pavimento, la tensión en ese punto es cero; cuando la rueda está exactamente en el punto considerado, la tensión es máxima. El tiempo de

duración del pulso de carga depende de la velocidad del vehículo y de la profundidad bajo la superficie del pavimento.

Existe una diferencia conceptual entre el módulo resiliente y el módulo de rigidez debido a que, para la determinación del módulo de rigidez se considera la deformación producida en el momento de aplicar la carga en cambio, en la determinación del módulo resiliente se considera la deformación recuperable luego de aplicar la carga. A este respecto, cabe mencionar que, dadas las características visco-elásticas de la mezcla asfáltica, la deformación recuperable se puede separar en dos componentes: una deformación recuperable en forma instantánea, luego de finalizar el pulso de carga y la deformación recuperable total, que se produce con un pequeño desfase luego de eliminada la carga, es decir, al terminar el período de relajación. Es por esto que en cuanto a módulo resiliente es posible hablar de módulo instantáneo y módulo total, como se observa en la figura de Pulso de carga "haversine" y deformaciones en mezclas asfálticas.

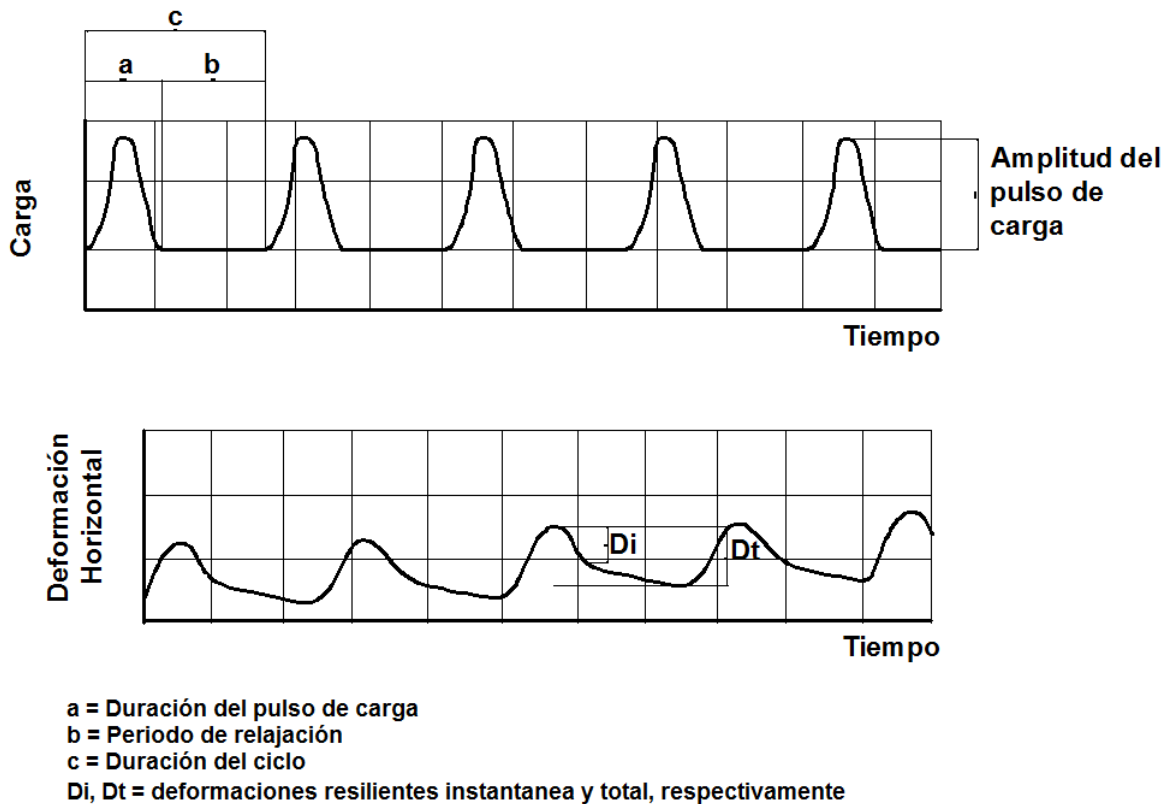


Figura 1. Pulso de carga "haversine" y deformaciones en mezclas asfálticas [9].

La expresión matemática del módulo resiliente está dada de la siguiente manera:

$$M_R = \frac{F \cdot (u + 0.27)}{(z \cdot h)}$$

Dónde:

MR: Módulo de Rigidez (MPa).

F: carga vertical axial aplicada (N).

u: coeficiente de Poisson.

h: altura de la probeta (mm).

z: Deformación de la probeta (mm).

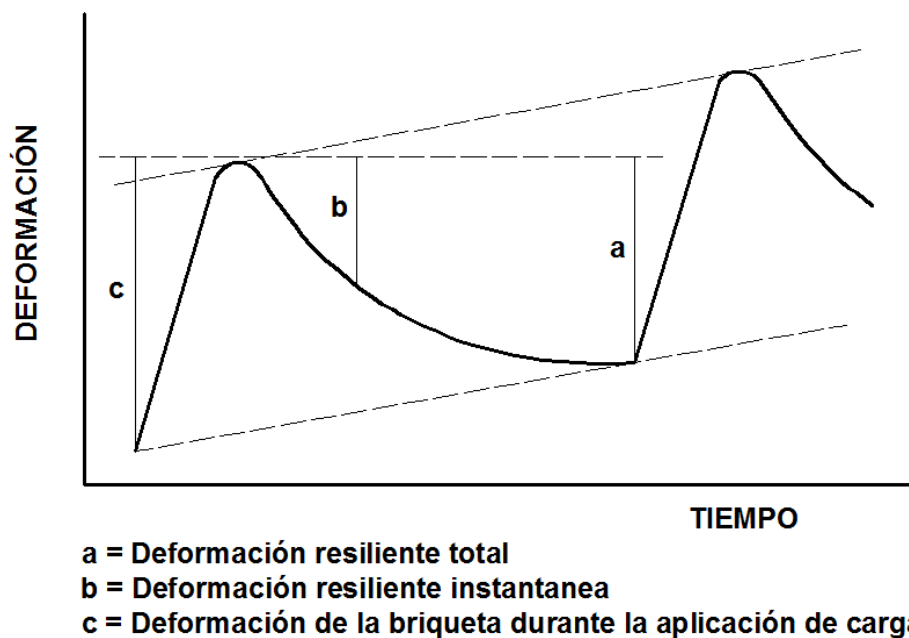


Figura 2. Representación gráfica de la deformación que sufre la mezcla asfáltica durante la aplicación de carga [9].

Se debe considerar que, si las cargas aplicadas son lo suficientemente pequeñas y las temperaturas de ensayo no son altas, las deformaciones producidas deben estar dentro del rango elástico, por lo cual teóricamente, la deformación producida durante la aplicación de

la carga debe ser igual a la deformación recuperable, es decir, que no existe deformación permanente. En ese caso el módulo de rigidez sería igual al módulo resiliente. Cabe destacar que los métodos de medición de módulo resiliente y módulo de rigidez intentan trabajar con deformaciones elásticas, por lo que es válido asumir que en estas condiciones ambas deformaciones lo son. En el diseño y análisis de pavimentos asfálticos, el módulo resiliente suele ser utilizado como el módulo de rigidez y se basa en la deformación recuperable bajo cargas repetidas (Loulizi, AL-Qadi, Lahouar, & Freeman, 2002).

Para la determinación del módulo resiliente en mezclas asfálticas, se utiliza el método estandarizado bajo la Norma EN 12697-26, "Ensayo de Tracción Indirecta sobre Especímenes Cilíndricos". Esta norma es de uso común para poder determinar la rigidez de las mezclas asfálticas. Existieron otros métodos para determinar módulo resiliente, tales como: AASHTO TP31 (2006), "Ensayo Estándar para la Determinación del Módulo Resiliente de Mezclas Asfálticas por Tensión Indirecta" y ASTM D4123-82 (1995), "Ensayo de Tracción Indirecta para el Módulo Resiliente de Mezclas Asfálticas", los cuales eran ensayos más largos y utilizados para capas asfálticas muy gruesas, sin embargo, estos han sido derogados y/o retirados [9].

### ***C. Historia en el mundo***

Los primeros esfuerzos de la recuperación y reutilización de materiales de pavimento asfáltico de los que se tiene conocimiento fueron desarrollados durante 1974 en Nevada y Texas (Newcomb et al., 2007; Hajj et al., 2009; Copeland, 2011; West, 2015).

En 1977 la National Asphalt Pavement Asociacion (NAPA) publicó el primer "Reporte sobre reciclado", en un entorno en el cual el reciclado de las mezclas asfálticas era completamente desconocido y nuevo. Por su parte, entre 1978 y 1980, la National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) publicó dos documentos afines al tema. El primero fue la "Síntesis práctica de carreteras No.54", y el "reporte No.224 sobre reciclado de materiales para carreteras", ambos dirigidos hacia el reciclado de materiales de pavimentos, mediante la unión de experiencias de distintas dependencias y organizaciones interesadas en el tema (Young, 1996; Newcomb et al., 2007).

La implementación del sistema Superpave en los Estados Unidos, limitó el uso de RAP en mezclas asfálticas, debido a que esta metodología de diseño había sido concebida solo para su uso en materiales vírgenes (asfalto y agregados); sin embargo, a mediados de los años 1990's, NAPA trabajó en sinergia con la Federal Highway Administration (FHWA) y la American Association State Highway Transportation Officials (AASHTO) con el fin de establecer nuevos lineamientos que hicieran posible la utilización de estos subproductos en las mezclas asfálticas Superpave. Posteriormente, el documento "NCHRP 9-12, Incorporación de Pavimento Asfáltico Recuperado en el sistema Superpave", confirmó la posibilidad de usar RAP en los diseños de mezclas asfálticas, así como lineamientos y procedimientos para ejecutar dichos diseños (Young, 1996) [10].

Varios autores han documentado el desempeño del RAP en tramos construidos en diferentes partes del mundo que respaldan la técnica, tales como Georgia, (Kandhal, Rao, Watson & Young, 1995), Louisiana (Paul, 1996), Barcelona (Centeno, Martínez, Miro & Perez, 2008), España (Gonzalo, Martínez, Pérez y Valdés, 2008), Illinois (Al-Qadi, et al., 2014), Colombia (Hernández, 2014), Australia (Petho & Denneman 2016). Tales experiencias, así como las recomendaciones de diseño y buenas prácticas dan paso a la aplicación de técnicas innovadoras con numerosos aportes económicos y ambientales que resultan en una mejor infraestructura vial [11].

#### ***D. Historia en Colombia***

Desde hace aproximadamente veintiséis (26) años en Colombia se viene implementando la tecnología de Reciclado de pavimentos, la cual surge de la necesidad de contribuir con el medio ambiente y disminuir costos en la construcción de las vías.

Los primeros intentos para reciclar los residuos producto de las labores de mantenimiento del pavimento asfáltico en nuestro país, se llevaron a cabo en Medellín y en Bogotá, mediante la disposición de un lote de terreno para acopiar los escombros o cuescos de pavimentos que resultaban de las tareas de parcheo de huecos y de la apertura de zanjas o brechas para la reposición de redes de servicio.

A comienzos de 1992 en Colombia se empezó a intensificar la técnica del reciclaje en frío utilizando emulsiones asfálticas como ligante. A partir de esto se ha venido ganando experiencia y conocimiento sobre la importancia del reciclado de pavimentos.

En la actualidad, el tratamiento in-situ de los materiales de pavimentos es de uso generalizado, debido a la llegada de potentes máquinas recicladoras que pueden rehabilitar pavimentos a un costo muy inferior de los métodos de reconstrucción convencionales. Además, considerando la situación de los pavimentos a nivel mundial, la rehabilitación de pavimentos existentes excede ampliamente la demanda de construcción de nuevas carreteras. Como consecuencia de esto, el reciclado in-situ ha sido adoptado en muchos países como el método recomendado para abordar el enorme trabajo pendiente en términos de rehabilitación de pavimentos.

En Colombia, se ha implantado el sistema de reciclaje de pavimentos en frío para diversos proyectos, se pueden nombrar algunas experiencias al respecto como: la vía Puertos López – Puerto Gaitán (Meta), Quibdó – Yuto (Choco), Medellín – Santuario (Antioquia), Cali - Loboguerrero (Valle del Cauca), Manizales - Mesones (Caldas), Autopista Bogotá – Villavicencio (Cundinamarca), entre otras. En la ciudad de Bogotá se ha llevado a cabo algunos trabajos de reciclaje en frío en vías principales, como: Av. Américas, Av. 68, Av. Boyacá, Av. Lara Bonilla. Cll 127 y en algunas vías de las localidades de: Engativá, Los Mártires, Kennedy, Usme, Bosa, entre otras. (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2007). En el Departamento de Antioquia también se ha llevado a cabo en la vía al mar destacándose los tramos: Uramita – Dabeiba – Mutatá – Chigorodó y El Tres – Turbo. En lo que respecta al área metropolitana del valle de aburrá es generalizada la utilización de la técnica en cada uno de sus municipios [12].

En una revisión cronológica de las especificaciones de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), se puede encontrar que en el año 1995 aún no se consideraba al RAP como material de construcción. No fue sino hasta el 18 de mayo de 2006 que mediante la resolución IDU 1959, se reguló el uso de los materiales obtenidos en el reciclaje de pavimento asfáltico en las secciones 450 y 454 de las especificaciones de

construcción IDU-ET-2005. En Bogotá se tienen registros de que, a partir del año 2007, se utilizan las emulsiones asfálticas para estabilizar el material obtenido del fresado de capas de pavimento asfáltico que ya han cumplido su vida útil y han sido removidas para ser remplazadas por mezclas asfálticas nuevas. Las obras de fresado estabilizado generan la posibilidad de habilitar vías para el uso por parte del tráfico liviano, que nunca han tenido estructura de pavimento y mejorar la calidad de vida en barrios de bajos recursos y vías deterioradas. En la ciudad de Bogotá se ha venido utilizando este tipo de mejoramiento desde hace algunos años de forma extensa por parte de la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV) (Torres Burgos, 2014) [13].

El 6 de septiembre de 2012 el Instituto Nacional de Vías, INVÍAS, publica un artículo denominado “Reciclado del pavimento, una técnica viable y económica para las vías” en el cual señala la importancia de la implementación de esta tecnología en las vías, como también la necesidad de capacitar a los profesionales en el tema para hacer una adecuada supervisión de los proyectos.

El reciclado de pavimentos flexibles, es una técnica viable y económica para el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras colombianas, ya que hace posible reutilizar los materiales que se encuentran dispuestos en nuestras carreteras, una vez han cumplido con la vida útil, lo que representa economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio, conservando así el patrimonio vial. Esa es la primera conclusión a la que se llegó durante el módulo I del segundo curso de pavimentos que contrató el INVÍAS con la Universidad Católica de Colombia, para capacitar a sus ingenieros [14].

Un ejemplo de aplicación de reciclaje en frío en sitio en Colombia, fue realizada en febrero de 2016 por el consorcio CONSOL. Sin embargo, cabe anotar que este ejemplo únicamente empleó cemento (4,5 por ciento) sin la adición de ningún residuo. (Consol, 2016). En esta experiencia se obtuvo una resistencia a la compresión de núcleos extraídos a los 7 días de haberse realizado el reciclaje entre 101 por ciento y 209 por ciento de la resistencia de diseño esperada (2,5MPa) [15].



### ***E. Normativa Colombiana***

De los antecedentes de tipo normativo, se tiene como referencia para el reciclaje en frío, las normas INVIAS y la especificación técnica del IDU 450-11, a continuación, se presenta un resumen de cada una de ellas.

#### ***1) Reciclado de pavimento asfáltico en frío en lugar empleando ligantes bituminosos ART. 461 – 13***

En Colombia, el reciclaje en frío con emulsión asfáltica o asfalto espumado ha sido normalizado a través del método Inmersión-compresión (norma INV E -738 2013). Con esta prueba mide la pérdida de resistencia a la compresión que se pierde por la acción del agua sobre mezclas compactadas. Se fabrican 6 muestras de dimensiones 101,6mm de diámetro y  $101,6 \pm 2,5$ mm de altura. El contenido de fluidos a utilizar es igual al contenido de humedad óptimo, teniendo en cuenta que el agua que se añade a la mezcla proviene, del agua de la emulsión, el agua adicional o agua de pre-envuelta y la humedad que pueda tener el material.

Se dividen en dos grupos: tres probetas se curan durante 14 días en el baño de aire a 25°C más o menos 1°C y con una humedad relativa de 50 por ciento y el segundo grupo se cura durante 7 días en el baño de aire y luego 7 días en el baño de agua a 25°C más o menos 1°C. Estas son ensayadas aplicando compresión inconfiada a una velocidad de deformación de 5.08mm/min.

Finalmente, se calcula la resistencia conservada, dividiendo la resistencia promedio de las muestras ensayadas luego del acondicionamiento en el baño de agua entre la sin acondicionar.

#### ***2) Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica –IDU.***

El método propuesto por el IDU (Instituto de desarrollo Urbano) en la sección 450-11 (Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá IDU, 2011). Describe que el proceso de reciclaje

en sitio con emulsión asfáltica, consiste en la disgregación de las capas asfálticas y parte de la base granular de un pavimento existente. Lo que se conoce como reciclaje a profundidad en sitio FDR (en inglés, full depth Reclamation) (Stroup-Gardiner, 2011).

Este método menciona la eventual adición de controladores de rotura, refiriéndose con esto, a los más utilizados: cemento, la cal hidratada y las cenizas volantes, cuyas características se deberán establecer en una especificación particular. Describe los posibles métodos a utilizar para el establecimiento del óptimo contenido de emulsión. Se puede utilizar el método de inmersión-compresión (Norma INV E-738-07), aplicándose los siguientes criterios como guía para la selección del óptimo contenido de ligante en la mezcla reciclada: resistencia de briquetas curadas en seco  $\geq 2000$  KPa y resistencia conservada tras curado húmedo  $\geq 75$  por ciento. Además, se puede diseñar por resistencia a la tracción indirecta o por módulo de rigidez, sin mencionar límites admisibles. El porcentaje óptimo de ligante residual será aquel que, cumpliendo las exigencias indicadas, consiga el valor máximo de resistencia tras curado húmedo.

Además, en materia de investigación, en la tesis de Juan Pablo Burbano en 2011 se ha trabajado en reciclaje en frío, evaluando la respuesta mecánica de muestras elaboradas con distintos tipos de RAP, con diferentes granulometrías, haciendo uso de una emulsión catiónica de rompimiento lento en 3 dosificaciones diferentes: 60, 75, 90 y 105 L/m<sup>3</sup> (dosificaciones para mezclas estabilizadas en campo). Los resultados de ensayos de densidad, estabilidad - flujo, inmersión compresión y módulos de rigidez muestran que el RAP estabilizado con las dosificaciones usadas y con las granulometrías presentadas, no resultó ser un material apto para colocación en estructuras de pavimentos cuyos tráfico fueran medios y altos. Se recomienda utilizarse para tráfico bajos o como material granular de relleno protegido por una carpeta asfáltica (Burbano Carvajal and Zuluaga Astudillo, 2011) [16].

## VII. METODOLOGÍA

### A. *Investigación y análisis de la información*

Teniendo en cuenta que se pueden realizar diferentes tipos de mezclas y de acuerdo a las necesidades que se evidencian en el mejoramiento de las vías de bajo volumen en el país, se contempla la realización de un ensayo de mezcla con Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP), y que en el presente trabajo se pretende efectuar mediante la composición de 100 por ciento de RAP con un porcentaje constante de cemento hidráulico del 12,5 por ciento y una variable en el porcentaje de emulsión asfáltica, para evaluar las propiedades mecánicas mediante diferentes ensayos de laboratorio y así poder definir qué tipo de mezcla presenta las mejores características de durabilidad en el tiempo y comportamiento a las cargas sometidas por el tráfico.

A partir de la consolidación de la información y en referencia a la investigación de diferentes autores se determinó la dosificación obtenida en los documentos hallados, en cuanto al porcentaje de emulsión óptimo para una mezcla que contiene materiales de reciclado de pavimento asfáltico (RAP) y emulsión asfáltica, para los cual se determina un porcentaje de partida del 3 por ciento, de igual modo, de acuerdo con lo establecido en las normas INVIAS para las mezclas con materiales de reciclado de pavimento asfáltico de acuerdo con la granulometría especificada, donde el material contiene un porcentaje de filler entre el 5 por ciento y el 20 por ciento, se determina reemplazar el porcentaje de filler por un porcentaje constante de cemento hidráulico que para este proyecto será del 12,5 por ciento. De esta manera se determina que para la mezcla y fabricación de las muestras los puntos de partida son estos porcentajes.

Teniendo en cuenta que se tiene que realizar una caracterización del material para evaluar las propiedades contenidas de un material que se ha sometido a diferentes sollicitaciones y tipos de carga el cual acarrea una fatiga generada por el tránsito, se le realizan una serie de ensayos para verificar las cualidades que se mantienen después de fresar el pavimento de una vía, teniendo en cuenta esta condición se toma como base para el análisis del material RAP las Normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Se tiene

como punto de partida para el análisis del material el Artículo 461-13, donde se especifica una serie de ensayos realizables para obtener la caracterización del Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), y así tener un foco de comparación de la calidad del material para ser utilizado en mezclas asfálticas en frío con adición de bitumen in situ en vías de bajo volumen de tránsito.

De esta manera se realizan los ensayos definidos en el proyecto, iniciando con la granulometría de la muestra de RAP, esto para saber si se tiene un material homogéneamente regular que se encuentre dentro de la banda granulométrica establecida en la norma INVIAS, y así determinar si el material necesita ajuste de tamaños y adición de materiales granulares o finos. También se tienen en cuenta los ensayos de desgaste del material en la máquina de los ángeles, para verificar si el RAP cuenta con las propiedades de dureza exigidas dentro de la Norma; degradación en el equipo Micro-Deval, para probar la resistencia del RAP al desgaste por abrasión de acuerdo con los parámetros que evalúa la Norma INVIAS; resistencia mecánica por el método 10 por ciento de finos, para comprobar la resistencia mecánica que tiene el agregado grueso del RAP sometido a una fuerza de compresión; equivalente de arena, extracción de asfalto, la cantidad de asfalto contenido en el material ensayado y tener una idea aproximada de las propiedades físicas que posee para utilizarlo en un diseño de mezcla en frío con materiales bituminosos.

### ***1) Programa experimental***

Teniendo la caracterización física del material a utilizar en el proyecto se realizó en el laboratorio la mezcla de los materiales en las siguientes proporciones (Tabla 1) teniendo en cuenta las normas y especificaciones del INVIAS se hacen 4 muestras con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica para la mezcla:

**Tabla 1.Dosificación de la mezcla en frío con RAP**

<b>MATERIALES</b>	<b>MUESTRA 1</b>	<b>MUESTRA 2</b>	<b>MUESTRA 3</b>	<b>MUESTRA 4</b>
% Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP).	100			
% Cemento hidráulico.	12,5			
% Emulsión Asfáltica.	3,0	5,0	7,0	9,0

Teniendo en cuenta que para el proyecto se estima realizar dos tipos de ensayos comparativos, Modulo Resiliente y Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI), es necesario ejecutar por cada porcentaje de emulsión asfáltica tres (3) especímenes para ser fallados y analizados.

De igual modo se pretende realizar un análisis comparativo fallando las muestras con diferentes edades de fraguado, para la tracción indirecta de 7, 14 y 28 días, y para el Modulo Resiliente de 14 y 28 días, y ejecutar un análisis mediante la elaboración de gráficas para determinar cuál de las mezclas ofrece mejores condiciones físicas y mecánicas para la utilización e implementación en los diferentes proyectos en la mejora de vías de bajos volúmenes de tráfico en Colombia.

## ***2) Caracterización física del material utilizado (RAP)***

Se realiza la caracterización física del material RAP mediante algunos ensayos de laboratorio, contemplados dentro de la norma INVIAS en el Artículo 461-13.

- Granulometría del material ensayado (RAP)
- Desgaste máquina de los ángeles (RAP)
- Degradación en el equipo Micro-Deval
- Resistencia mecánica por el método 10 por ciento de finos
- Equivalente de arena (RAP)
- Porcentaje de asfalto contenido en el RAP

## Granulometría:

La granulometría realizada al material de RAP se ejecuta tomando como base la granulometría establecida en las especificaciones determinadas en la Norma INVIAS del 2013 en el artículo 461 como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2. Franja granulométrica de los agregados reciclados en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos (Tabla INVIAS 461-1)**

<b>MATERIAL</b>	<b>TAMIZ (mm / U.S. Standard)</b>							
	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
	<b>% PASA</b>							
<b>PULVERIZADO DEL PAVIMENTO EXISTENTE, AJUSTADO CON MATERIAL DE ADICIÓN CUANDO SE REQUIERA</b>	100	75 -  100	65 -  100	45 -  75	30 -60	20 - 45	10 - 30	05 - 20

Teniendo en cuenta lo expuesto en la Tabla 2 se realiza el cuarteo de la muestra de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), y se toma una parte de este procediendo al pesaje y se realiza el tamizado comparando con la banda granulométrica que contiene la especificación del INVIAS.



**Fotografía 1. Granulometría del material (Fuente <https://www.academia.edu>)**

### **Desgaste máquina de los ángeles:**

Este ensayo se realiza mediante la máquina de los ángeles que consiste en un tambor que contiene un aspa que hace que el material rote hasta caer por gravedad, se introduce el material con unas esferas de acero que hacen que el material presente un desgaste a determinadas revoluciones, lo que permite medir el porcentaje de degradación que puede tener un material.

Para el desgaste en la máquina de los ángeles nuevamente se toma como referencia la Norma INVIAS y la especificación del artículo 461-13, (Tabla 3), extraída de la Tabla 461-2 “Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente”. Para la realización del ensayo se utiliza la granulometría (A), ya que el material ensayado contiene tamaños mayores a  $\frac{3}{4}$ ”, (Tabla 4), contenida en la Tabla 218-1 (Granulometría de las muestras de ensayo) de la norma de ensayos del INVIAS E-218-13.



Fotografía 2. Desgaste máquina de Ángeles (Fuente propia)

Tabla 3. Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente (Desgaste Máquina de los Ángeles).

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV.	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT-1	NT-2	NT-3
<b>Dureza, agregado grueso (0)</b>				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)	E-218	40	40	40

Tabla 4. Granulometría de las muestras de ensayo

DESGASTE MAQUINA DE LOS ÁNGELES					
DATOS SOBRE GRADACIÓN, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES					
TAMAÑOS		GRADACIÓN DE LA MUESTRA Y MASA (g)			
PASA	RETENIDO	A	B	C	D
1 1/2"	1"	1250			
1"	3/4"	1250			
3/4"	1/2"	1250	2500		
1/2"	3/8"	1250	2500		
3/8"	No.3			2500	
No.3	No.4			2500	
No.4	No.8				5000
Nº ESFERAS		12	11	8	6
Nº REVOLUCIONES		500	500	500	500



### **Degradación en el equipo Micro-Deval:**

El ensayo de Micro-Deval se realiza colocando el material en agua durante una hora o más se coloca en un recipiente junto con una serie de esferas de diámetro aproximado de 0,95 cm, y se somete a un desgaste a 100 RPM durante 2 horas, el porcentaje del desgaste se mide pesando el material que pasa por el tamiz No 16 expresado en porcentaje.

La realización de este ensayo es importante para saber el comportamiento del material RAP (Agregado grueso) al desgaste en condiciones de lluvia, se utilizan las granulometrías que se presenta en la Norma INVIAS E-238 en los numerales 7.2, 7.3 y 7.4, las cuales están contenidas en la Tabla 5, para desarrollar el ensayo al material utilizado en el proyecto se tomó la gradación No 1 de dicha tabla.



**Fotografía 3. Ensayo Micro-Deval (Fuente Propia)**

**Tabla 5. Granulometría para el ensayo de Micro – Deval.**

<b>Tamaño Tamiz (mm) abertura cuadrada</b>		<b>Masa de los tamaños indicados (g)</b>		
<b>Pasa</b>	<b>Retenido en</b>	<b>Gradación</b>		
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
19.0 (3/4")	16.0 (5/8")	375		
16.0 (5/8")	12.5 (1/2")	375		
12.5 (1/2")	9.50 (3/8")	750	750	
9.50 (3/8")	6.30 (1/4")		375	750
6.30 (1/4")	4.75 (No. 4)		375	750
<b>Revoluciones</b>		100±5	100±5	100±5
<b>Duración</b>		2 h ± 1 min	105±1 min	95±1 min
<b>Total (g)</b>		1500±5	1500±5	1500±5

### **Resistencia mecánica por el método 10 por ciento de finos:**

El ensayo consiste en agregar el material a ensayar en un recipiente y se somete el material a un esfuerzo gradual de compresión hasta lograr establecer la carga que produce un 10% de finos en el material.

El ensayo de resistencia mecánica por el método 10 por ciento de finos se le realiza a la muestra de RAP utilizada para la mezcla de las briquetas de acuerdo con la Norma INVIAS de ensayo E-224-13, esto para identificar que el material que se está utilizando puede soportar un tránsito NT1 de acuerdo con lo estipulado en el proyecto. Aunque la norma no estipula un valor mínimo para un tránsito NT1, se toma como referencia los datos del tránsito NT3 que es el único que maneja un valor mínimo para este ensayo, lo que se quiere identificar del material es que los valores no sean tan altos en comparación con lo contenido en la Norma INVIAS de acuerdo a la Tabla 6.



**Fotografía 4. Ensayo de resistencia mecánica por método 10% de finos. (Fuente propia)**

**Tabla 6. Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente (Resistencia mecánica por el método 10 por ciento de finos).**

<i><b>CARACTERÍSTICA</b></i>	<i><b>NORMA DE ENSAYO INV</b></i>	<i><b>NIVEL DE TRÁNSITO</b></i>		
		<i><b>NT-1</b></i>	<i><b>NT-2</b></i>	<i><b>NT-3</b></i>
<b>Dureza, agregado grueso (0)</b>				
Resistencia mecánica por el método del 10 por ciento de finos	E-224			
-Valor en seco, mínimo (KN)				70
-Relación húmedo/seco, mínimo (%)				75

#### **Equivalente de arena:**

Este ensayo consiste en colocar una cantidad de material fino en un tubo plástico y agitarlo para que las partículas de arcilla se desprendan de la arena, luego se le agrega una solución que hace que las partículas de arcilla se mantengan por encima de la arena, se realiza la lectura de la altura de la arena y la arcilla y la relación entre estas es el porcentaje de arena hallado.

El ensayo de equivalente de arena tomado al material de RAP, se realiza de acuerdo con lo establecido en la Norma INVIAS E-133-13 y según el artículo 461-13, (Tabla 7), y que es extraído de la Tabla 461-2 “Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente” de la norma. El ensayo se realiza para determinar la contaminación

que pueda poseer el material (RAP) utilizado en el proyecto, este ensayo se realiza utilizando el material pasante del tamiz No 4 y retenido en el tamiz No 200.



Fotografía 5. Ensayo equivalente de arena (Fuente: <https://twitter.com/cytemsl>)

Tabla 7. Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente (Equivalente de Arena).

<i>CARACTERÍSTICA</i>	<i>NORMA DE ENSAYO INV</i>	<i>NIVEL DE TRÁNSITO</i>		
		<i>NT-1</i>	<i>NT-2</i>	<i>NT-3</i>
<b>Limpieza, gradación combinada (F)</b>				
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30

#### **Porcentaje de asfalto contenido en el RAP:**

Este ensayo consiste en realizar una extracción del ligante del material de reciclado de pavimento asfáltico RAP, mediante lavado con un solvente que hace que se desprenda el ligante y se expresa como porcentaje de acuerdo con la pérdida de masa con respecto a la inicial.

Teniendo en cuenta que el fresado utilizado para el presente proyecto ya trae un porcentaje de asfalto vinculado a la mezcla original, también es necesario realizar la extracción de asfalto para obtener el porcentaje que contiene la muestra utilizada y tener una idea clara y completa de las propiedades físicas del material que se va a utilizar en el proyecto.

La extracción de asfalto se realiza teniendo en cuenta la Norma INVIAS E-732 mediante el MÉTODO A, y se realiza la granulometría de la muestra de acuerdo con la Norma E-782-13 del INVIAS.

## **VIII. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL (RAP)**

### ***A. Resultados y análisis de laboratorios de caracterización física del (RAP)***

Al realizar la caracterización física del material del Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), y tomando como base las especificaciones del INVIAS del 2013, se hace un análisis de los resultados hallados en los diferentes ensayos ejecutados.

#### **Granulometría:**

Teniendo en cuenta que la muestra obtenida para la realización del estudio se tomó en planta y no directamente de un proyecto de fresado y que en el transporte del material se pueden perder tamaños y alterar su granulometría, es también cierto que en Colombia el fresado de pavimento asfáltico se utiliza en mayor medida para reparación y mejoramiento de vías con bajos volúmenes de tránsito, este material en un gran porcentaje se almacena en stocks para ser reutilizado posteriormente.

La metodología para la realización de los diferentes laboratorios se hace tomando el material directamente de un stock y tomando como base la Norma del INVIAS artículo 461-13 “RECICLADO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO EN EL LUGAR USANDO LIGANTES BITUMINOSOS”, para efectuar la caracterización del material. De acuerdo con lo establecido en la norma se toma la granulometría sugerida en el artículo 461-13 del INVIAS, para tener un referente comparativo de inicio del material seleccionado para el proyecto.

Realizando el ensayo de granulometría se obtienen los resultados mostrados en la Figura 3, donde se observa que la granulometría del material ensayado RAP está cumpliendo con lo establecido en la norma ya que se encuentra dentro de los límites establecidos en la franja granulométrica exigida para este tipo de material. Lo que da una certeza de que el material utilizado se puede adaptar según la especificación.

Tabla 8. Granulometría del material para el proyecto (RAP)

GRADACIÓN MATERIAL RAP (Reciclado de Pavimento asfáltico)							
			PESO INICIAL:			8023,0	
TAMIZ		PESO RETENIDO	PORCENTAJE			ESPECIFICACIÓN: ARTICULO 461, TABLA 461-1 RAP	
PULGADA	mm		RETENIDO	RET. ACUM.	PASA		
3"	75	0,00				100,0	100,00
2 1/2"	37,50	0,00			100,0	100,0	100,00
2"	50,80	30,00	0,37	0,37	99,6	100,0	100,00
1 1/2"	38,10	63,50	0,79	1,17	98,8	100,0	100,00
1"	25,00	200,50	2,50	3,66	96,3	100,0	100,00
3/4"	19,00	556,50	6,94	10,60	89,4	75,00	100,00
3/8"	9,52	1820,00	22,68	33,29	66,7	52,00	78,00
No. 4	4,76	1510,00	18,82	52,11	47,9	35,00	59,00
No. 10	2,00	1098,00	13,69	65,79	34,2	20,00	40,00
No. 40	0,42	1629,50	20,31	86,10	13,9	8,00	22,00
No. 200	0,075	1115,00	13,90	100,00	0,0	0,00	9,00
P/200	P/0,074	0,00	0,00	100,00			

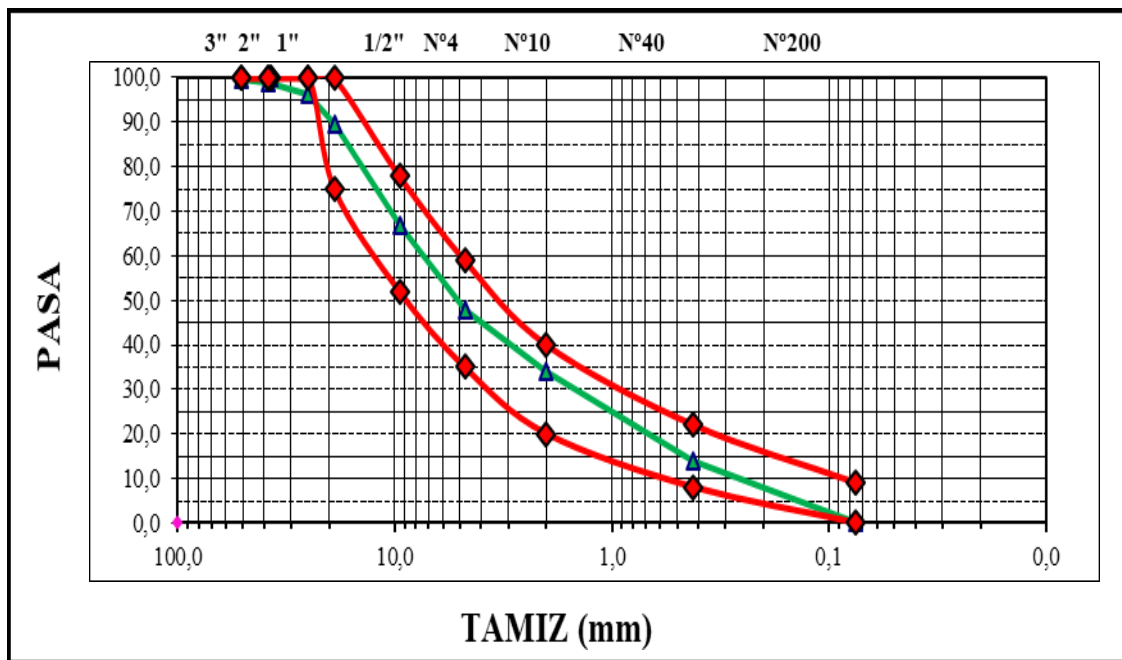
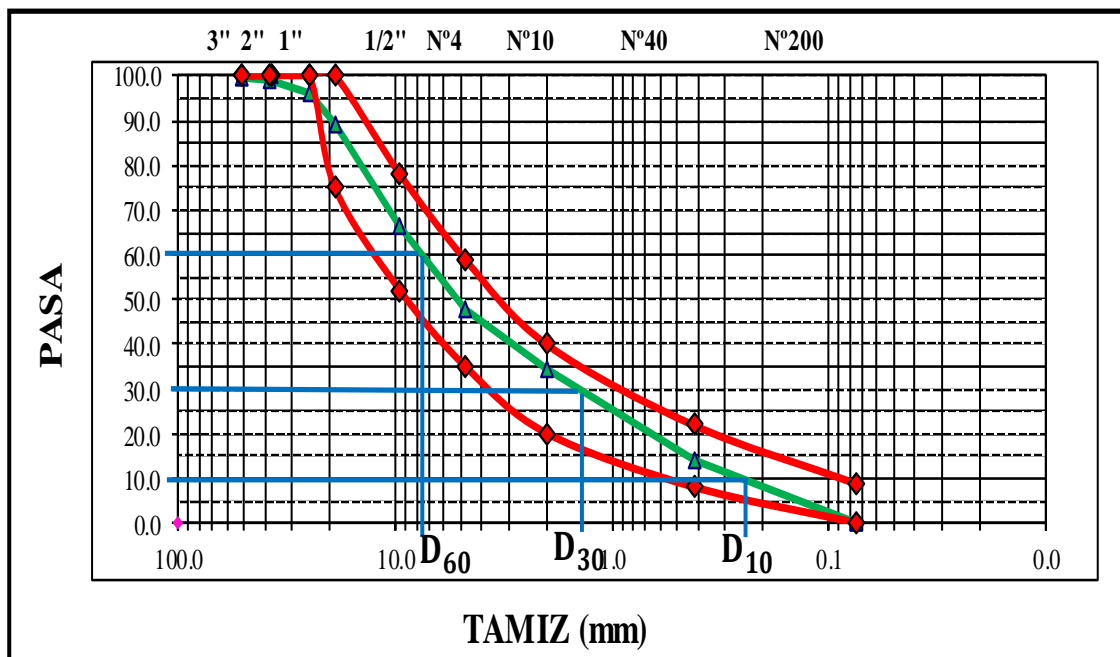


Figura 3. Granulometría (RAP).

— Banda granulométrica  
 — Granulometría del material





Hallamos los coeficientes de curvatura  $C_c$  y el coeficiente de uniformidad  $C_u$ , para comprobar si la granulometría se encuentra bien realizada y está bien gradada.

Entonces:

$$D_{10} = 0,28$$

$$D_{30} = 1,70$$

$$D_{60} = 7,50$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_u = \frac{7,50}{0,28} = 26,79$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$$C_c = \frac{1,70^2}{7,50 * 0,28} = 1,38$$

De acuerdo a los datos obtenidos se concluye que el material de reciclado de pavimento asfáltico (RAP) está bien gradado ya que el  $C_u > 6$  y  $1 \leq C_c \leq 3$

#### **Desgaste máquina de los ángeles:**

Analizando y tomando en cuenta el resultado obtenido en el ensayo de desgaste de la máquina de los ángeles y comparando con lo que se exige en la norma del INVIAF en el artículo 461-13, el material de fresado utilizado para el proyecto está cumpliendo debido a que el porcentaje de desgaste es menor al máximo establecido en la especificación, como se muestra en los resultados de la Tabla 9. Lo que quiere decir que el material de RAP tomado es el adecuado para el presente proyecto.

**Tabla 9. Resultados desgaste máquina de los Ángeles.**

<b>DESGASTE POR ABRASIÓN</b>			
Determinación	No.	1	2
Gradación Usada		A	A
Numero de esferas		12	12
Masa inicial	g	5002	5002
Masa final	g	4679	3389
Pérdida	g	323	1613
Índice de Desgaste	%	6,5 %	32,2 %

<b>Convenciones Desgaste</b>
1 = En seco, 100 revoluciones
2 = En seco, 500 revoluciones

<b>Resultado</b>
Índice de Desgaste (%)
32,2

La Norma INVIAS establece que el porcentaje máximo admitido para un material de RAP es de 40 por ciento, lo que evidencia de acuerdo al resultado obtenido de 32,2 por ciento de desgaste en la máquina de los ángeles, que el material se puede utilizar teniendo como referencia esta normatividad.

También se comprueba si el material tiene una dureza uniforme, realizando el ensayo a 100 RPM para hallar el porcentaje de desgaste, y también a 500 RPM y la diferencia entre los dos materiales no debe dar más de 20% por ciento para un material de dureza uniforme. Teniendo en cuenta que la diferencia es de un 25, 7% por ciento, lo que hace concluir que el material no tiene una dureza uniforme, debido tal vez a la fatiga a la que se ha sometido y la repetición del tráfico que soporto.

### Ensayo Micro – Deval:

Mediante el ensayo Micro-Deval se puede obtener la pérdida por abrasión de los agregados en presencia del agua para el reciclado de pavimento asfáltico (RAP), analizando el resultado obtenido en el ensayo y que se muestran en la Tabla 10, la muestra arroja un porcentaje de desgaste del material del 21,2 por ciento lo que indica que este material se puede someter a un tráfico más riguroso como es el NT3, es decir que el material se comportara de forma excelente para lo que se está buscando con este proyecto, que es una mezcla para ser utilizada en vías de bajo nivel de tráfico NT1 y con mezclas frías elaboradas in situ con material de RAP.

**Tabla 10. Resultados ensayo Micro - Deval.**

<b>PRUEBA No</b>	<b>1</b>
GRADACIÓN USADA	A
PESO ESFERAS (g)	<b>5000</b>
TIEMPO ENSAYO (min)	120
Pa= PESO MUESTRA SECA ANTES DE ENSAYO (g)	1500,2
Pb= PESO MUESTRA SECA DESPUÉS DE LAVAR SOBRE TAMIZ 1.18 mm (No. 16) (g)	1182,7
Pa-Pb= PERDIDA (g)	<b>317,5</b>
% DESGASTE (Pa-Pb)/Pa	<b>21,2 %</b>
ESPECIFICACIÓN MÁXIMO	—

Teniendo en cuenta los dos resultados obtenidos de los ensayos de desgaste máquina de los Ángeles y ensayo Micro – Deval los porcentajes de desgaste son coherentes en cuanto la diferencia es tan solo del 11 por ciento y sabiendo que el ensayo en la máquina de los Ángeles es más riguroso por el tamaño de las esferas se observa que el material mantiene un desgaste adecuado para la realización de la mezcla.

**Resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10 por ciento de finos:**

Los resultados obtenidos en el ensayo de la resistencia por el método de 10 por ciento de finos, ratifican que el fresado utilizado para el proyecto es de muy buena calidad teniendo en cuenta que la norma INVIAS, exige que el valor mínimo seco en KN es de 70 y la relación húmeda/seco debe ser del 75 por ciento para un tráfico NT3, confirma la seguridad en la calidad del material utilizado y vías de bajos niveles de tráfico NT1. Como se muestra en la Tabla 11 el valor de la fuerza para producir un 10 por ciento de finos en seco es de 171 KN, y la relación Húmedo/seco es de 81,7 por ciento.

**Tabla 11. Resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10 por ciento de finos.**

<b>Clase de Agregado:</b>	<b>FRESADO</b>	
<b>Condición del Agregado:</b>	<b>Seco</b>	<b>Húmedo</b>
Masa del Agregado para Ensayo (g):	2184	2197
Masa del Agregado Usado M1 (g):	2184	2197
Masa Pasa Tamiz 2.36 mm (No. 8) M2 (g):	202	226
Masa Retenida Tamiz 2.36 mm (No. 8) M3 (g):	1982	2266
por ciento Material Pasa Tamiz 2.36 mm (No. 8) <i>m</i> :	9,2	10,3
Fuerza Máxima Aplicada (t):	16,525	16,525
Fuerza Máxima Aplicada <i>f</i> (kN):	162	143

**Resultados resistencia mecánica de los agregados gruesos por el método de 10 por ciento de finos.**

<b>Fuerza Requerida para Producir un 10 % de Finos:</b>	<b>Seco</b>	<b>171 NN</b>
	<b>Húmedo</b>	<b>140 KN</b>

<b>por ciento Relación Húmedo / Seco</b>
<b>81,7 por ciento</b>

### **Equivalente de arena.**

El resultado del equivalente de arena tomado al material ensayado de RAP, muestra que está cumpliendo dentro de lo que especifica la norma INVIAS en el artículo 461-13 y establecido dentro de la Tabla 461-2 “Requisitos de los agregados de adición para reciclado del pavimento existente” en cuanto al contenido de arena, teniendo en cuenta que la norma exige un 30 por ciento mínimo y el material presenta un contenido de arena del 72 por ciento, como se aprecia en la Tabla 12.

**Tabla 12. Resultado equivalente de arena.**

<b>ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA</b>			
<b>PRUEBA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN (°C)	<b>22,8</b>		
LECTURA DE ARCILLA mm	<b>92</b>	<b>93</b>	<b>90</b>
LECTURA DE ARENA mm	<b>68</b>	<b>64,17</b>	<b>63,9</b>
EQUIVALENTE DE ARENA mm	73,9	69,0	71,0
PROMEDIO mm <sup>3</sup>	72		
ESPECIFICACIÓN % MÍNIMO	30		

Aunque la granulometría muestra un porcentaje bajo de finos y este ensayo no debería ser necesario, este mismo se hace para tener una idea más clara de cuanta contaminación de arcilla puede generarse al realizar la actividad de fresado y que este pueda desmejorar sus condiciones físicas.

### **Porcentaje de asfalto contenido en el RAP:**

El porcentaje de asfalto obtenido del ensayo de extracción de asfalto muestra que este material aun contiene propiedades con las cuales se puede contar para la realización de mezclas en frio y que es importante para el desarrollo del proyecto.

Tabla 13. Extracción de asfalto Norma: I.N.V.: E-732 E-782

GRANULOMETRÍA			
Tamiz	P. Retenido	% Retenido	% Pasa
2"			100,0
1½"			100,0
1"			100,0
¾"			100,0
½"	8,7	0,7	99,3
⅜"	12,8	1,1	98,2
4	251,8	20,8	77,4
10	306,4	25,3	52,1
40	293,4	24,3	27,8
80	184,1	15,2	12,6
200	149,2	12,3	0,2
FONDO	2,8	0,2	
TOTAL	1209,2	100,0	

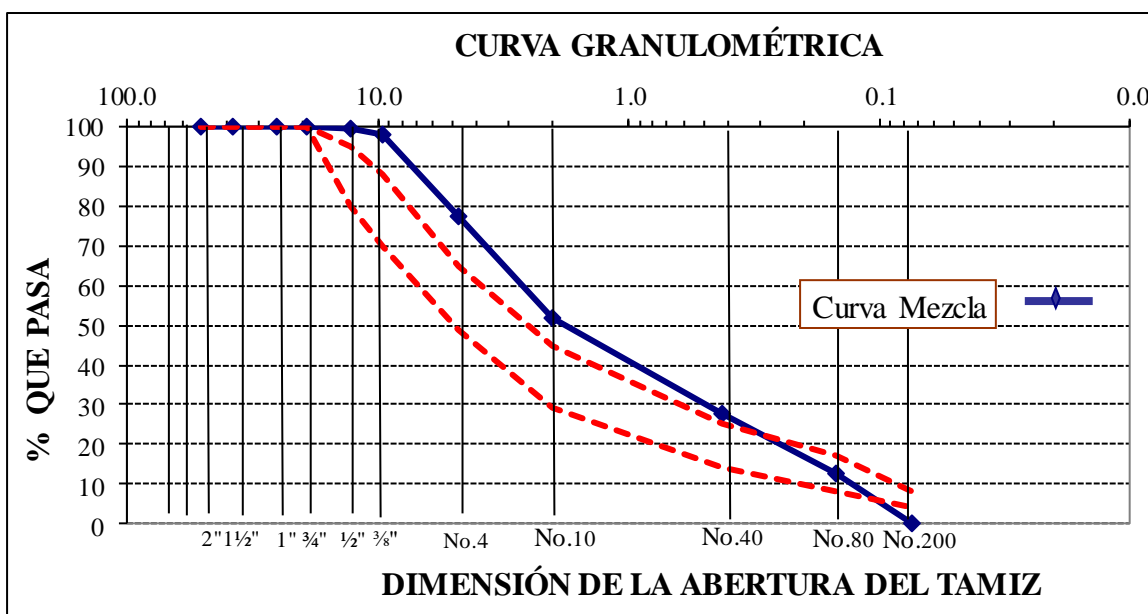


Figura 4. Granulometría extracción de asfalto.

### Resultados contenidos de asfalto

CONTENIDO DE ASFALTO	
Peso inicial, g	1504,0
Peso restante, g	1404,8
Contenido de asfalto, %	6,6

El asfalto contenido en la muestra de fresado utilizada para el proyecto es del 6,6 por ciento.

#### ***B. Ensayos mecánicos a la mezcla de reciclado de pavimento asfáltico (RAP) con bitumen cml-1 y cemento hidráulico, obtención y análisis de resultados.***

Teniendo la caracterización física del material de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), se procede con la realización de la mezcla con los diferentes porcentajes de materiales detallados anteriormente, para la realización de los diferentes especímenes o briquetas que se evaluarán bajo los criterios y resultados de los ensayos mecánicos de laboratorio contenidos dentro de la Norma INVIAS del 2013, para esto se cuenta con la realización de los siguientes ensayos:

- Resistencia a la tensión indirecta de la mezcla con RAP.
- Módulo resiliente RAP.

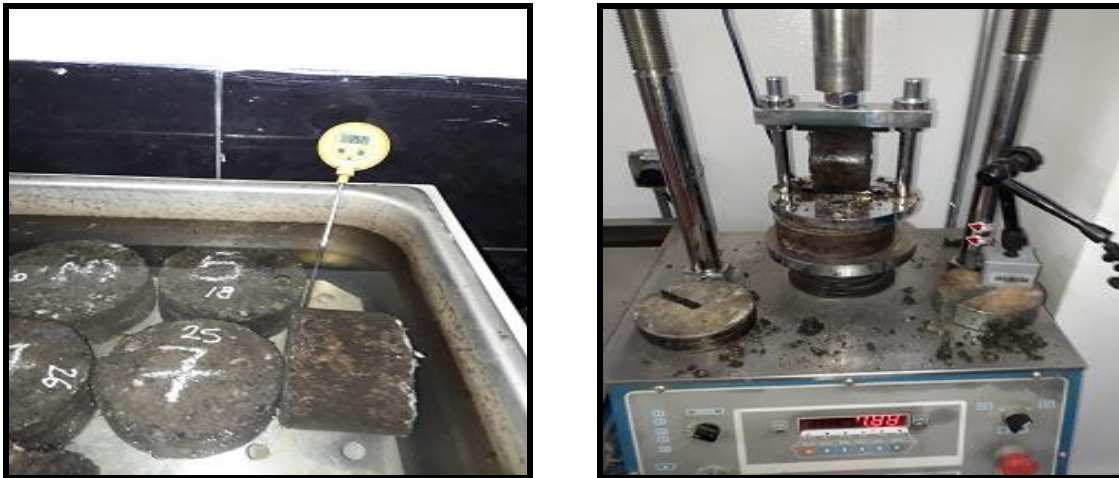
#### **Resistencia a la tensión indirecta de la mezcla con RAP:**

Contando con los especímenes o briquetas realizadas con la mezcla entre el Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), emulsión asfáltica CRL-1 y el cemento hidráulico, y refiriendo el porcentaje variable de emulsión asfáltica entre 3 por ciento, 5 por ciento, 7 por ciento y 9 por ciento, para la realización de la mezcla y construcción de las briquetas teniendo en consideración que el porcentaje de cemento hidráulico es constante para este proyecto que es del 12,5 por ciento. De acuerdo con esto se realizan los ensayos mecánicos a los

especímenes o briquetas que para este proyecto son los de Resistencia a la tracción indirecta (RTI), y Modulo Resiliente.

Para el ensayo de Resistencia a la tracción indirecta se toman las dimensiones de los especímenes que por norma el diámetro no debe ser mayor a 10 cm y la altura de 6,5 cm, se sumergen las briquetas a baño de maría a una temperatura de 25°C durante una hora y utilizando el método C de acuerdo con la Norma INVIAS E-786-13, se retiran las probetas del baño de maría y los especímenes se someten a falla mediante la aplicación de una carga vertical de compresión en la maquina universal de carga, se toman los datos que la maquina arroja de manera digital en unidades de KN.

Teniendo los datos hallados de cada briqueta fallada se determina el cálculo de la Resistencia a la tracción indirecta (RTI) mediante la fórmula establecida en la Norma INVIAS E-786-13 en el numeral 7.1:



Fotografía 6. Ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI)

$$RTI = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

Donde:

RTI: Resistencia a la tracción indirecta, Kpa.

P: Carga máxima, N.

t: Altura del espécimen inmediatamente antes del ensayo, mm.

D: Diámetro del espécimen antes del ensayo, mm.



Teniendo en cuenta que se elaboraron tres especímenes por cada porcentaje de emulsión asfáltica mezclado con los materiales utilizados para el proyecto, y realizando un curado en seco de las briquetas a 7, 14 y 28 días, se realiza la toma de los datos de la lectura de la falla de cada una de las briquetas y se realiza un promedio para obtener un solo valor por cada porcentaje de emulsión asfáltica teniendo en cuenta el tiempo de curado de cada biqueta y así realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos contenidos en la Tabla 14.

**Tabla 14. Resultados obtenidos de la Resistencia a la tracción indirecta en el laboratorio (RTI)**

No Biqueta	% Cemento hidráulico	% De Asfalto	RTI (N) 7 Días	No Biqueta	% Cemento hidráulico	% De Asfalto	RTI (N) 14 Días	No Biqueta	% Cemento hidráulico	% De Asfalto	RTI (N) 28 Días
1	12.5	3	6940	4	12.5	3	7194	7	12.5	3	11650
2	12.5	3	5920	5	12.5	3	6771	8	12.5	3	11490
3	12.5	3	5490	6	12.5	3	7424	9	12.5	3	10360
10	12.5	5	4870	13	12.5	5	5251	16	12.5	5	10700
11	12.5	5	6220	14	12.5	5	6446	17	12.5	5	12050
12	12.5	5	5940	15	12.5	5	6920	18	12.5	5	12070
19	12.5	7	6030	22	12.5	7	5710	25	12.5	7	12270
20	12.5	7	6570	23	12.5	7	5944	26	12.5	7	12260
21	12.5	7	5830	24	12.5	7	7047	27	12.5	7	13300
28	12.5	9	4860	31	12.5	9	5846	34	12.5	9	9250
29	12.5	9	5290	32	12.5	9	6466	35	12.5	9	9180
30	12.5	9	5180	33	12.5	9	6460	36	12.5	9	10020

Conocidos los resultados directamente del ensayo se procede a la obtención del esfuerzo de tracción máximo a partir de la fuerza máxima registrada en la maquina en unidades de presión (MPa).

**Tabla 15. Resultados obtenidos de la Resistencia a la tracción indirecta (RTI) en MPa.**

No Briquea	% Cemento hidráulico	% Asfalto	RTI (MPa) 7 Días	No Briquea	% Cemento hidráulico	% Asfalto	RTI (MPa) 14 Días	No Briquea	% Cemento hidráulico	% Asfalto	RTI (MPa) 28 Días
1	12.5	3	0.68	4	12.5	3	0.70	7	12.5	3	1.14
2	12.5	3	0.58	5	12.5	3	0.66	8	12.5	3	1.13
3	12.5	3	0.54	6	12.5	3	0.73	9	12.5	3	1.01
10	12.5	5	0.48	13	12.5	5	0.51	16	12.5	5	1.05
11	12.5	5	0.61	14	12.5	5	0.63	17	12.5	5	1.18
12	12.5	5	0.58	15	12.5	5	0.68	18	12.5	5	1.18
19	12.5	7	0.59	22	12.5	7	0.56	25	12.5	7	1.20
20	12.5	7	0.64	23	12.5	7	0.58	26	12.5	7	1.20
21	12.5	7	0.57	24	12.5	7	0.69	27	12.5	7	1.30
28	12.5	9	0.48	31	12.5	9	0.57	34	12.5	9	0.91
29	12.5	9	0.52	32	12.5	9	0.63	35	12.5	9	0.90
30	12.5	9	0.51	33	12.5	9	0.63	36	12.5	9	0.98

**Tabla 16. Promedio de resultados**

% DE ASFALTO	RTI (MPa) 7 DÍAS	RTI (MPa) 14 DÍAS	RTI (MPa) 28 DÍAS
3%	0.60	0.70	1.09
5%	0.56	0.61	1.08
7%	0.60	0.61	1.24
9%	0.50	0.61	0.93

**Desviación estándar**

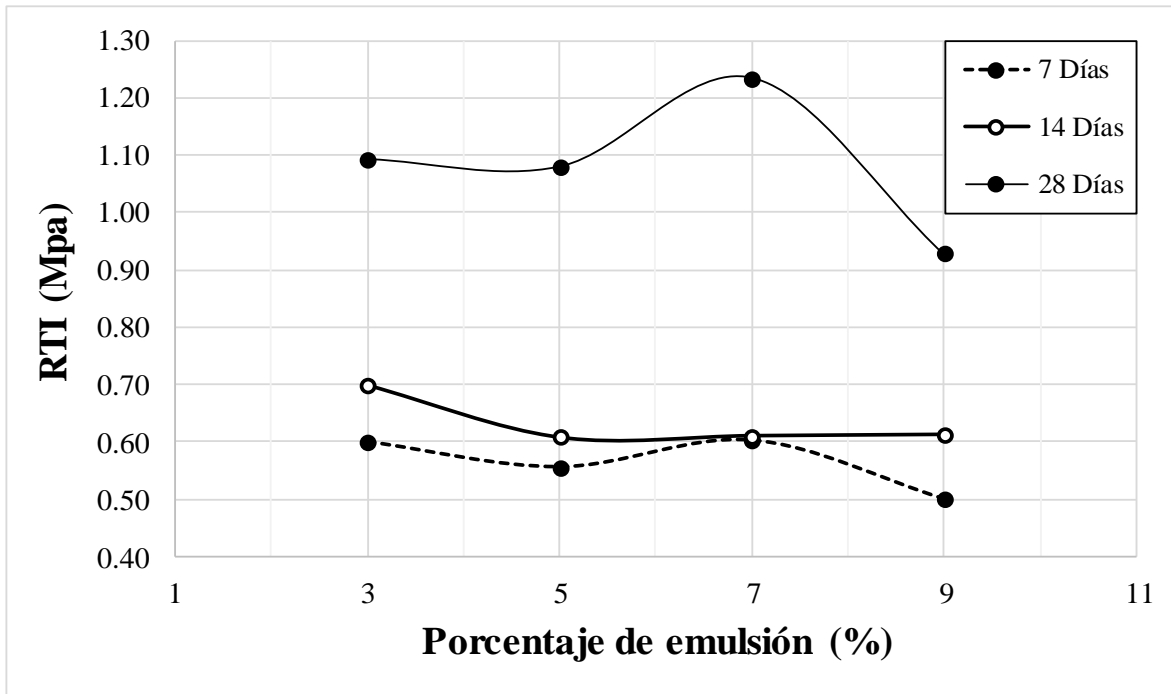
% DE ASFALTO	RTI (MPa) 7 DÍAS	RTI (MPa) 14 DÍAS	RTI (MPa) 28 DÍAS
3%	0.07	0.03	0.07
5%	0.07	0.08	0.08
7%	0.04	0.07	0.06
9%	0.02	0.03	0.05

**Coefficiente de variación**

% DE ASFALTO	RTI (MPa) 7 DÍAS	RTI (MPa) 14 DÍAS	RTI (MPa) 28 DÍAS
3%	12%	5%	6%
5%	13%	14%	7%
7%	6%	11%	5%
9%	4%	6%	5%

Teniendo en cuenta los coeficientes de variación se observa que la mezcla con el porcentaje de emulsión asfáltica que muestra mayor dispersión en sus datos, es la mezcla con el 5% por ciento y el día de curado con mayor coeficiente de variación y dispersión en sus datos es a los 14 días.

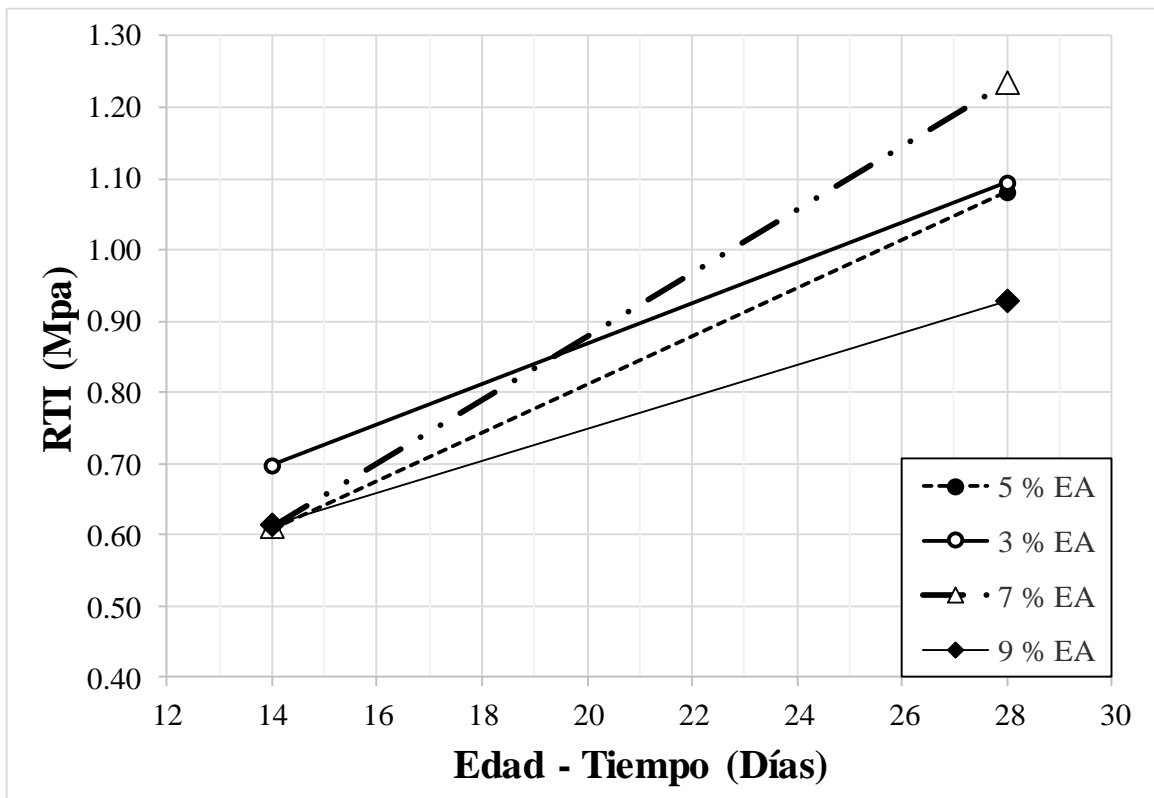
De acuerdo con los resultados obtenidos se realiza las gráficas para realizar el análisis correspondiente de los resultados hallados de la mezcla en frio de Reciclado de Pavimento Asfaltico (RAP).



**Figura 5. Resistencia a la tracción indirecta Vs porcentajes de emulsión asfáltica.**

Teniendo en cuenta que la gráfica (Figura 5) indica la resistencia de los especímenes de acuerdo con los porcentajes de emulsión asfáltica a las diferentes edades de curado en seco, se evidencia que la resistencia tiene un aumento considerable de acuerdo con el tiempo de curado, siendo un indicador de la mejora de la respuesta antes las cargas ejercidas por el tráfico. Particularmente los incrementos son más evidentes de 14 a 28 días, que de 7 a 14 días.

De acuerdo con la figura, se tiene que el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica con el cual la mezcla se comporta con mejores propiedades a la resistencia de las cargas ejercidas sobre esta es el 7% por ciento. Asimismo, se presenta un incremento de resistencia considerablemente mayor de 14 a 28 día, que de la primera a la segunda semana.



**Figura 6. Resistencia a la tracción indirecta Vs tiempo de curado.**

Como se ve en la Figura 6, para los valores de EA más altos (9 %) y bajos (3 %) las pendientes son menos inclinadas, para valores intermedios se tiene un incremento de la pendiente, lo que evidencia un mayor efecto del cemento sobre el incremento de la resistencia; su efecto es más acentuado de la resistencia para la mezcla de 7 % de EA. Tal comportamiento evidencia una reacción más favorable del cemento hidráulico sobre las mezclas para ciertos contenidos de emulsión asfáltica.

### **Módulo resiliente RAP:**

El ensayo para hallar el módulo resiliente realizado a los especímenes o briquetas de las diferentes mezclas elaboradas con los distintos porcentajes de emulsión asfáltica se efectúa en la maquina universal de ensayos UTM, la cual mediante el software integrado que entrega resultados al instante con las cargas aplicadas al espécimen o briqueta obteniendo los módulos resiliente de cada una de estas, con ancho del pulsos de carga variables que para el caso del presente proyecto son de 100, 200 y 400 milisegundos (ms), una carga de

contacto de 1200 N y un periodo de repetición del pulso de la carga de 1000 milisegundos (ms).

La calibración del pulso se realiza tomando la forma de la carga de medio seno verso y de esta manera la forma del pulso de la carga es de  $1 - \cos \Theta/2$ . El tiempo de aplicación de la carga en este ensayo depende del pulso de la carga: para un pulso de 100 ms el tiempo de aplicación es de 100 ms en un periodo de 4,2 segundos, para un pulso de 200 ms el tiempo de aplicación de la carga es de 400 ms en un periodo de 4,4 segundos y para un pulso de 400 ms el tiempo de aplicación de la carga es de 800 ms en un periodo de 4,8 segundos. La carga de contacto preestablecida del pulso es de 120 N.

El ensayo se realiza colocando el espécimen dentro de las mordazas asegurando la briqueta y ubicando cada uno de los sensores que se encuentran ajustados al software empleado para el cálculo del módulo resiliente de la mezcla, luego se ajusta dentro de la cabina que aísla la muestra de cualquier afectación externa, se ajustan los sensores horizontales a cero y con una temperatura constante de 20 °C, se procede a llenar los datos que pide el software como son los diámetros y alturas de los especímenes, el número de la briqueta, se ajusta el ancho del pulso de la carga y se evalúa a 100, 200 y 400 (ms) y este realiza la evaluación del material o de la mezcla arrojando como resultado el valor del módulo resiliente y la deflexión recuperable que tiene el material.



**Fotografía 7. Ensayo de módulo resiliente (MR) (Fuente propia)**

Realizando el ensayo se obtienen los siguientes resultados tabulados en la Tabla 17 y Tabla 18, se muestra un ejemplo de la plantilla de resultados generados por el software en el ensayo de módulo resiliente.

**Tabla 17. Resumen de resultados de módulos resiliente**

<b>MR (Mpa)</b>				
14 Días	3 por ciento	5 por ciento	7 por ciento	9 por ciento
100	7788	6560	5352	4850
200	7395	6161	5002	4515
400	7008	5835	4605	4147
<b>MR (Mpa)</b>				
28 Días	3 por ciento	5 por ciento	7 por ciento	9 por ciento
100	9014	7648	6105	5445
200	8532	7160	5907	5113
400	7967	6675	5541	4771

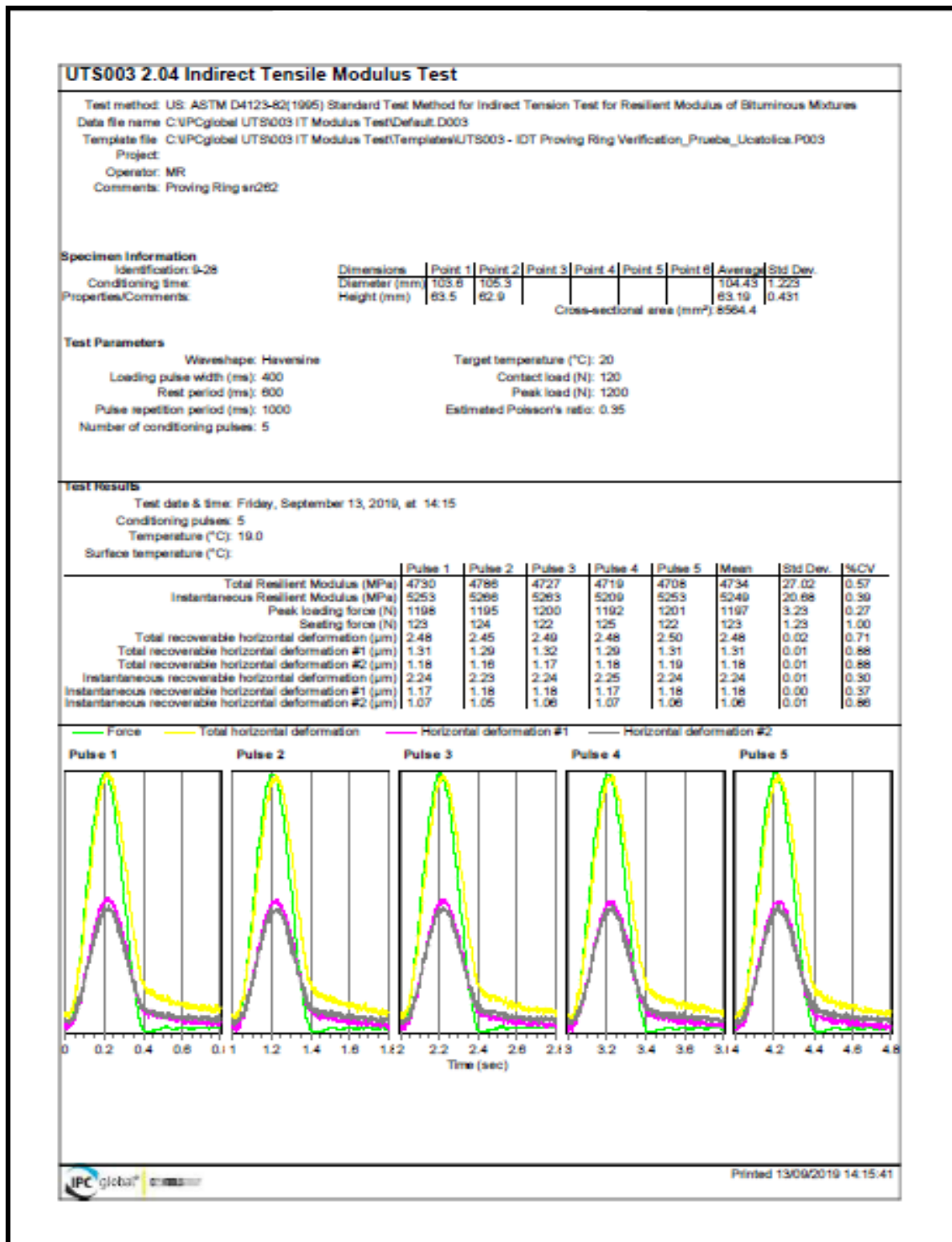
**Tabla 18. Resumen de resultados de deformaciones recuperables**

<b>DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE (μm)</b>				
14 Días	3 por ciento	5 por ciento	7 por ciento	9 por ciento
100	1.53	1.77	2.16	2.38
200	1.57	1.88	2.32	2.55
400	1.66	1.98	2.52	2.77
<b>DEFORMACIÓN TOTAL RECUPERABLE (μm)</b>				
28 Días	3 por ciento	5 por ciento	7 por ciento	9 por ciento
100	1.29	1.51	1.94	2.11
200	1.36	1.61	1.99	2.25
400	1.45	1.72	2.13	2.41

“El ensayo de tensión indirecta con cargas repetidas para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas se lleva a cabo aplicando cargas de compresión con ondas de forma de medio seno verso. La carga se aplica verticalmente sobre un plano diametral de un espécimen cilíndrico de concreto asfáltico. Se miden las deformaciones recuperables horizontal y vertical resultantes y, a partir de ellas, se calculan valores de la relación de poisson resiliente. Posteriormente, se calculan valores del módulo resiliente a partir de la relación de poisson. De la interpretación de los datos de deformación resultan dos valores del módulo resiliente: uno, llamado módulo resiliente instantáneo, que se calcula empleando la deformación recuperable que ocurre instantáneamente durante la parte de descarga de un ciclo; el otro, llamado módulo resiliente total, se calcula empleando la deformación recuperable total, que incluye tanto la recuperable instantánea, como la recuperable dependiente del tiempo, que continua durante la descarga y el resto del periodo de reposo de un ciclo” (Tomado de la Norma de Ensayos del INVIAS E-249-13, Numeral 3.1).



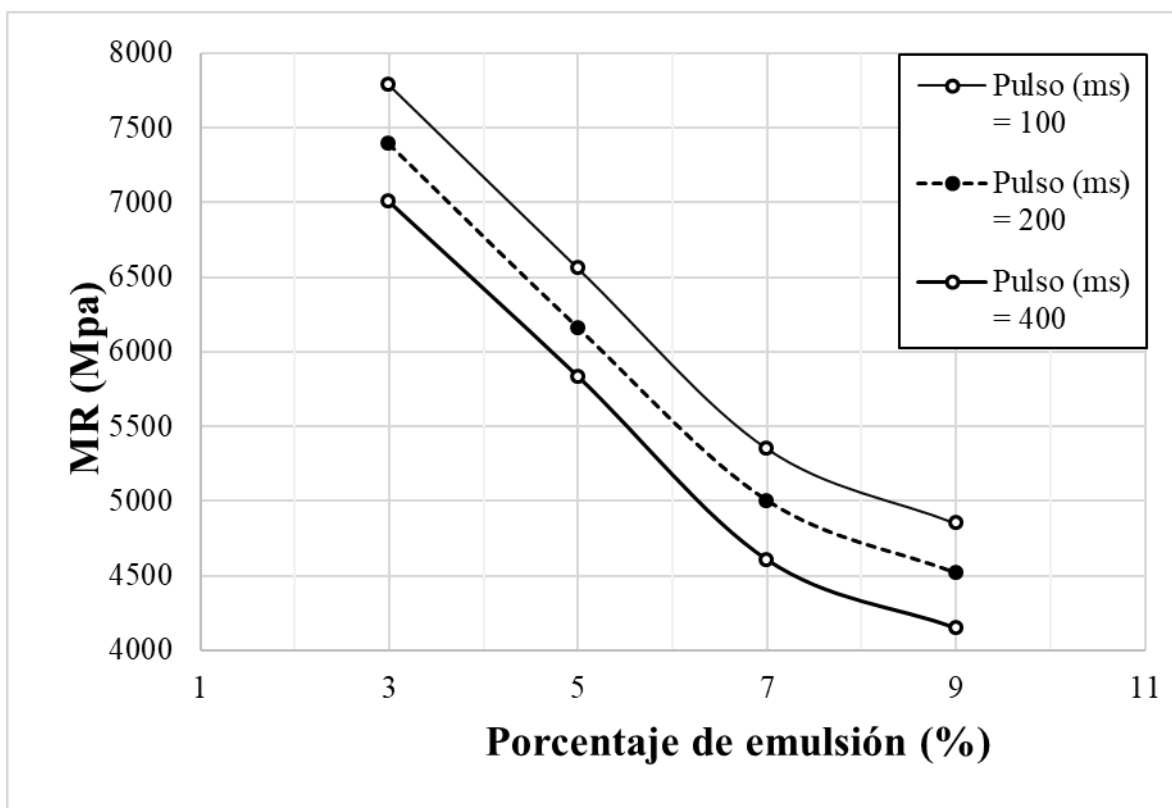
## Plantilla de resultados generados por el software en el ensayo de módulo resiliente



Tomando en cuenta que la cantidad de resultados son considerables se realiza un resumen de los datos obtenidos, teniendo en cuenta los porcentajes de emulsión asfáltica contenidos en la mezcla que son 3, 5, 7 y 9 por ciento, precisando los días de curado que para este ensayo se realizaron a los 14 y 28 días.

Este ensayo provee las características de recuperación elástica de los materiales o de la mezcla utilizada obteniendo el análisis de desempeño de la mezcla frente a una frecuencia de pulsaciones verticales con una magnitud de fuerza de 1200 N por cada milisegundo, estas pulsaciones generan la obtención de la capacidad mecánica del material o de la mezcla utilizada para este proyecto.

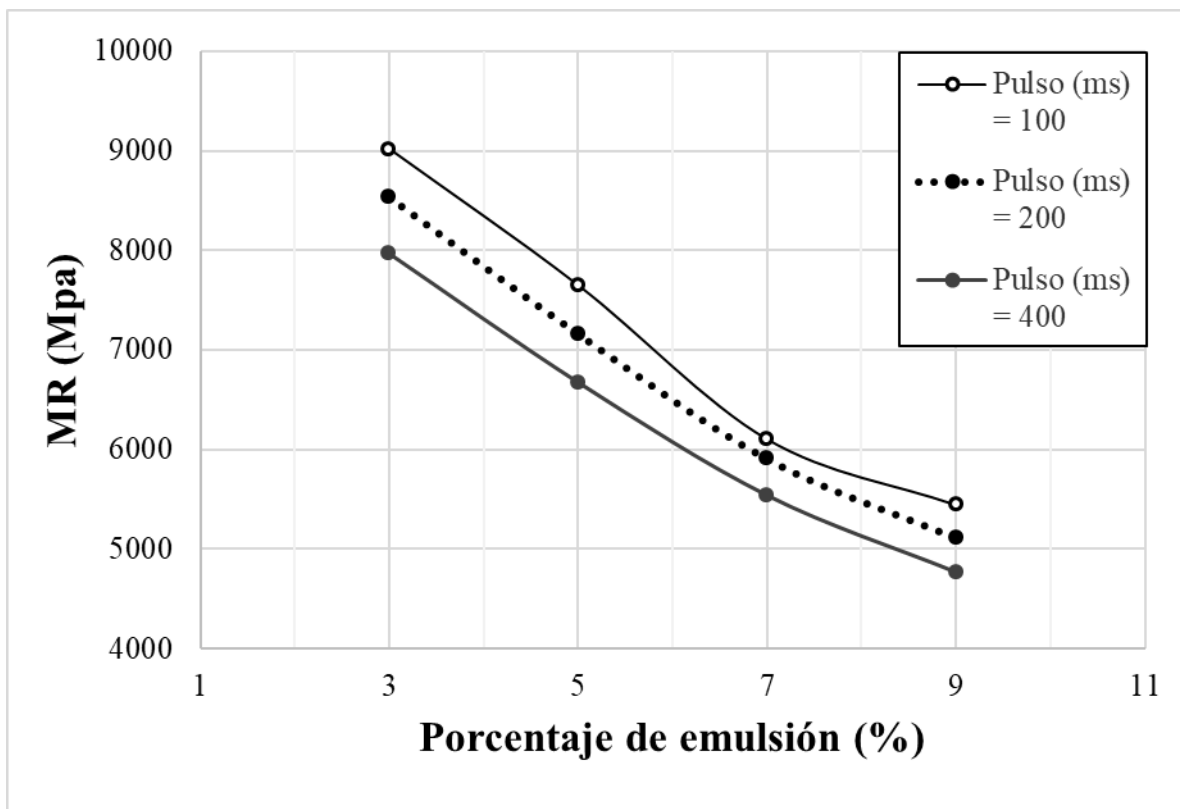
Teniendo en cuenta que en el ensayo de módulo resiliente (MR) la carga al ser relativamente baja se espera que no ocasione deformación permanente en los especímenes ensayados, comparando con los valores de falla hallados en el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI), que son valores de carga que oscilan entre 5000 N y 12000 N, lo que soporta le hecho de tratarse de un ensayo no destructivo.



**Figura 7. Módulo resiliente Vs porcentaje de emulsión asfáltica para un tiempo de curado de 14 días.**

Como se observa en la gráfica (Figura 7) entre menor sea la duración del pulso de la carga, la mezcla tiene una deformación resiliente menor, lo que repercute en una mayor resiliencia del material. Asimismo, al ser constante el periodo del pulso, aquellos pulsos con menor tiempo de aplicación de carga equivalen a un tráfico con mayor velocidad y por ende, un mayor tiempo de descanso.

Por su parte, el contenido de emulsión influye en la respuesta dinámica de la mezcla, al tornar más deformable la mezcla. Esto es, para bajos contenidos de EA, la deformación resiliente es menor, lo que se traduce en un mayor MR y a su vez, en mezclas más frágiles. Este hecho se hace más evidente para mayores tiempos de cura, como mostrado en la Figura 8, donde el valor de los módulos tiene un incremento para todas las mezclas, lo que indica un incremento de rigidez general debido a la presencia de cemento.



**Figura 8. Módulo resiliente Vs porcentaje de emulsión asfáltica para un tiempo de curado de 28 días.**

Analizando los resultados y las curvas en las gráficas 7 y 8 se observa que la mezcla a partir de 7% por ciento de emulsión asfáltica la pendiente de la curva tiende a disminuir, lo que indica que la influencia en altos porcentajes de emulsión asfáltica sobre la respuesta del módulo resiliente no es tanta como cuando se utilizan bajos porcentajes de contenido de emulsión asfáltica en la mezcla del proyecto

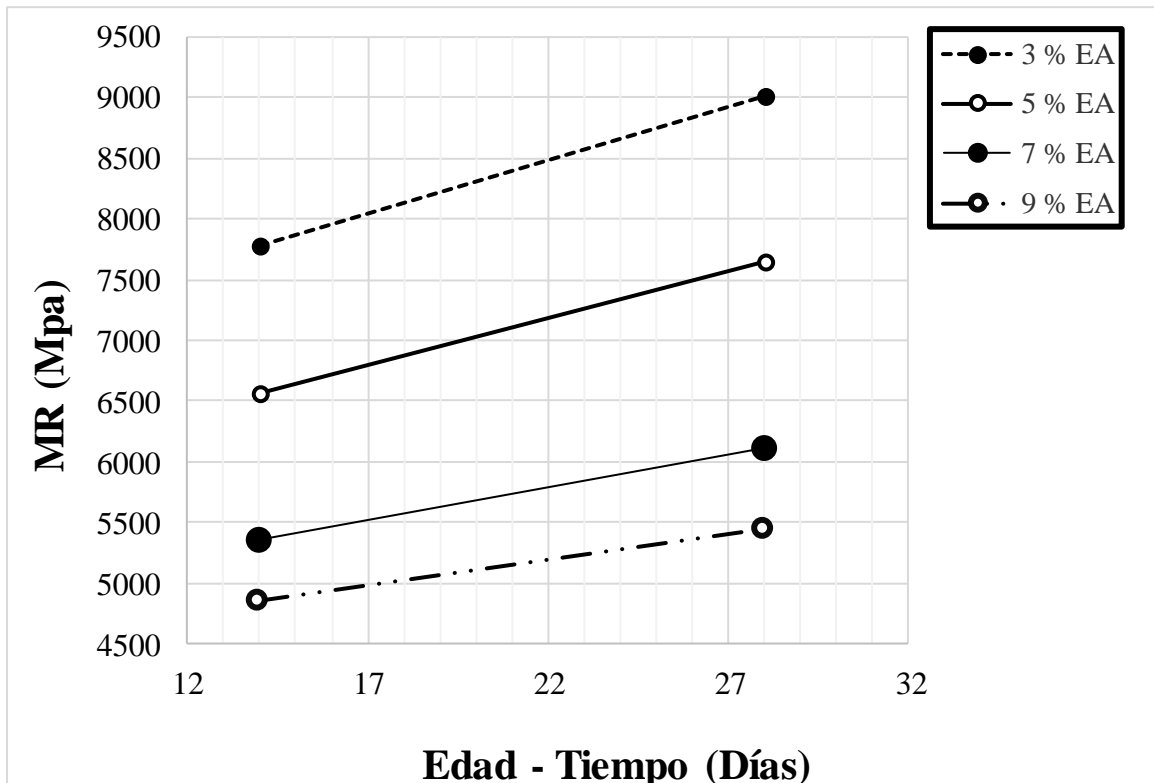
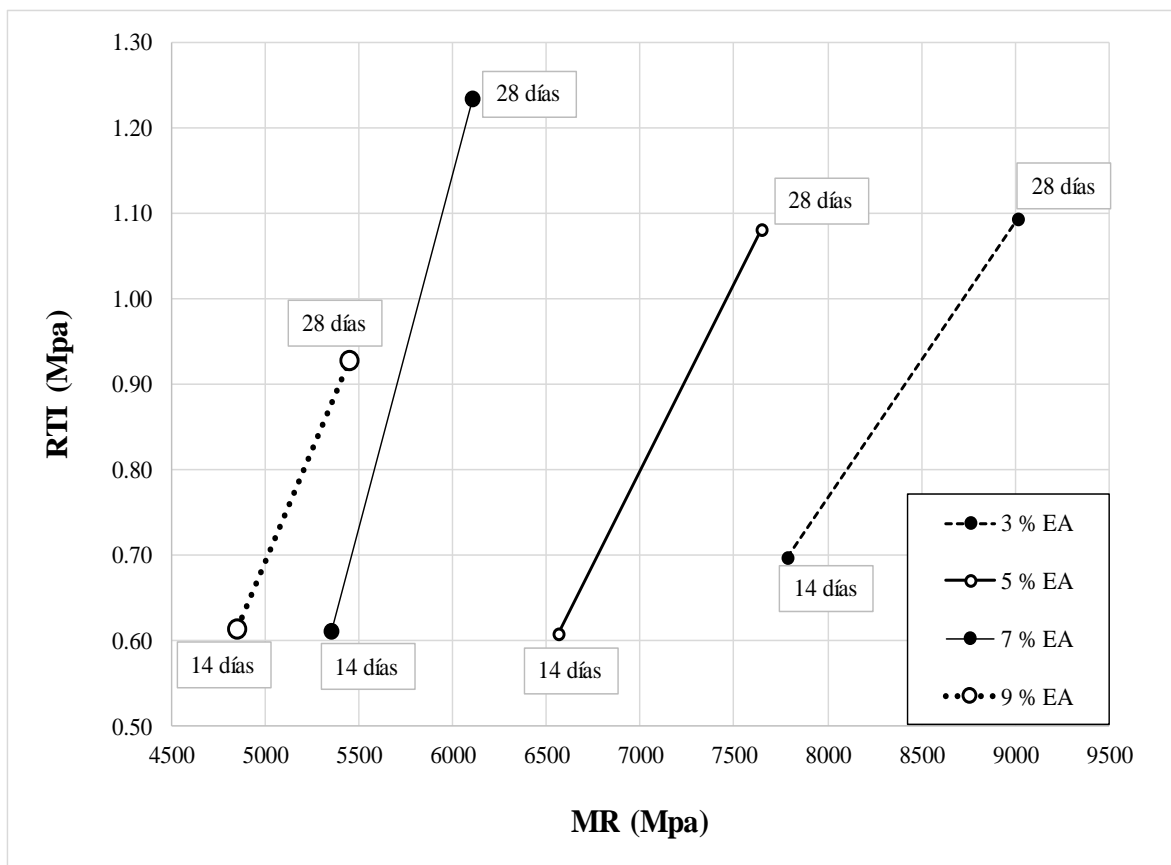


Figura 9. Módulo resiliente Vs tiempo de curado de la mezcla.

Como se puede observar en la gráfica (Figura 8) se confirma que la mezcla con menor porcentaje de emulsión asfáltica tiene recuperación elástica ante las cargas aplicadas y por ende, su módulo resiliente aumenta a medida que la mezcla se cura y adquiere su resistencia máxima.

Dentro de las posibilidades que se pueden presentar dentro de los resultados mostrados en los ensayos de la mezcla es que con un 7 % por ciento de emulsión asfáltica tenga una mayor resistencia, pero eso no implica que su módulo deba ser mayor. Probablemente para 7% por ciento se obtuvo una mayor resistencia, pero una mayor deformación; es decir, que probablemente la mezcla tiende a ser más resistente pero más dúctil (que puede tender más a tener problemas de deformación permanente), mientras que para bajos contenidos de EA la mezcla tiende a ser menos resistente y más frágil (que puede tender a tener problemas de fatiga).

Observando los resultados y que el margen que se presenta entre los dos tipos de mezcla una con el 3% por ciento de emulsión asfáltica y la otra con un porcentaje del 7% por ciento de emulsión asfáltica es considerable que se podría suponer que para cumplir un parámetro que satisfaga los dos resultados de los ensayos de laboratorio sería conveniente que la mezcla se realizara con un 3 por ciento de adición de emulsión asfáltica, siendo coherentes se realiza una comparación grafica de los dos ensayos tomando los porcentajes y el tiempo de curado de la mezcla y que se presenta en la Figura 10.

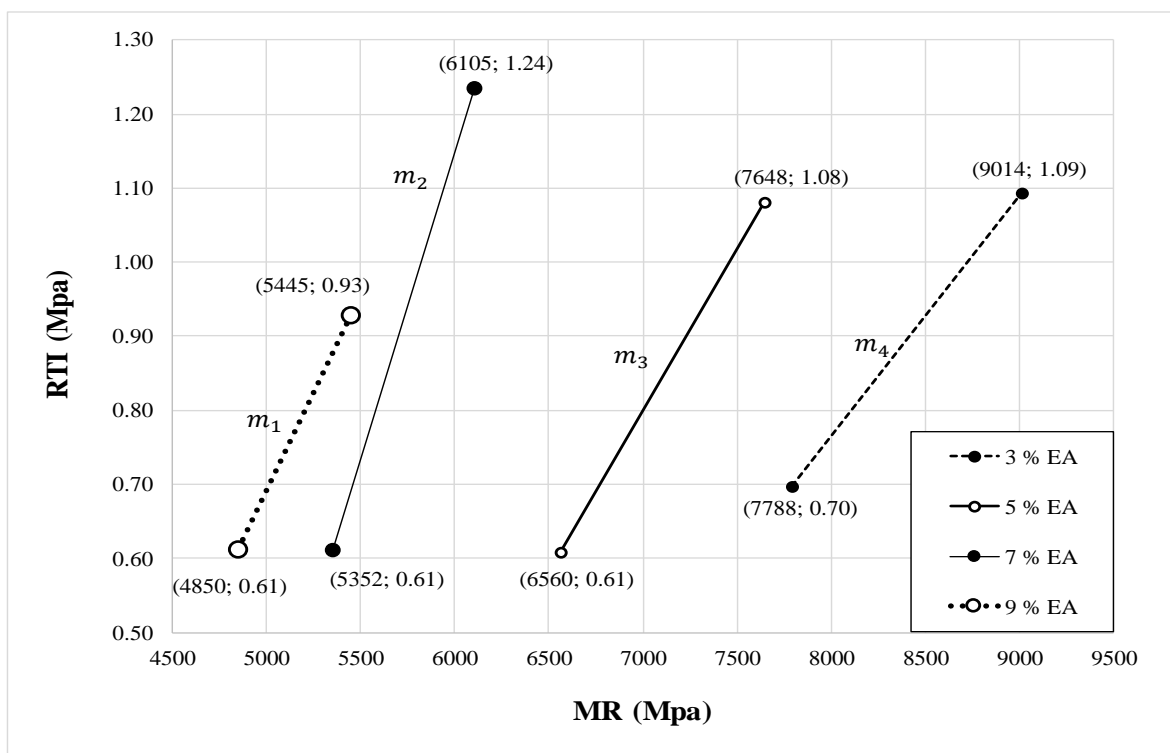


**Figura 10. Comparativo de resultados ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) Vs Módulo Resiliente (MR).**

Al realizar el análisis de la gráfica de la Figura 10, se evidencia el comportamiento de las mezclas con diferentes porcentajes de emulsión asfáltica y a distintas edades de curado en seco, donde se refleja que ciertas mezclas se comportan mejor a la resistencia a la tracción indirecta, pero a la vez obteniendo menores valores de Módulo Resiliente, en este caso una mezcla con un porcentaje de emulsión asfáltica del 7 por ciento tiene una resistencia a la

tracción muy alta con respecto a las otras mezclas, pero al mismo tiempo el aumento en la variación del Módulo Resiliente es más pequeña en comparación con las otras mezclas, esto quiere decir que al tener un aumento menor en el valor del Módulo Resiliente la mezcla tendrá un comportamiento dúctil generando que esta con el tiempo presente algunos tipos de deterioro como: ahuellamiento, depresiones o hundimientos longitudinales y depresiones o hundimientos verticales, lo que nos indica que esta mezcla no sería la más adecuada para ser utilizada en un proyecto para mejoramiento en vías de bajos volúmenes de tráfico.

Teniendo en cuenta lo anterior se detalla y se profundiza en la evaluación de los resultados para sustentar de manera más clara y precisa mediante el análisis de las pendientes de cada una de las rectas halladas en el comparativo entre los resultados de la Resistencia a la Tracción Indirecta y el Módulo Resiliente a diferentes edades de curado y con los diferentes porcentajes de variación de la emulsión asfáltica (EA).



**Figura 11. Comparativo de resultados ensayo de Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) Vs Módulo Resiliente (MR) mediante la pendiente de cada una de las rectas.**

Para realizar el análisis con mayor profundidad se hallan las pendientes de cada una de las rectas que se muestran en la Figura 11. La pendiente es adimensional.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Para la mezcla con 3% de emulsión asfáltica:

$$m_{3\%} = \frac{1,09 - 0,70}{9014 - 7788}$$

$$m_{3\%} = \frac{0,39}{1226}$$

$$m_{3\%} = 3,2 * 10^{-4}$$

Para la mezcla con 5% de emulsión asfáltica:

$$m_{5\%} = \frac{1,08 - 0,61}{7648 - 6560}$$

$$m_{5\%} = \frac{0,47}{1088}$$

$$m_{5\%} = 4,3 * 10^{-4}$$

Para la mezcla con 7% de emulsión asfáltica:

$$m_{7\%} = \frac{1,24 - 0,61}{6105 - 5352}$$

$$m_{7\%} = \frac{0,63}{753}$$



$$m_{7\%} = 8,4 * 10^{-4}$$

Para la mezcla con 9% de emulsión asfáltica:

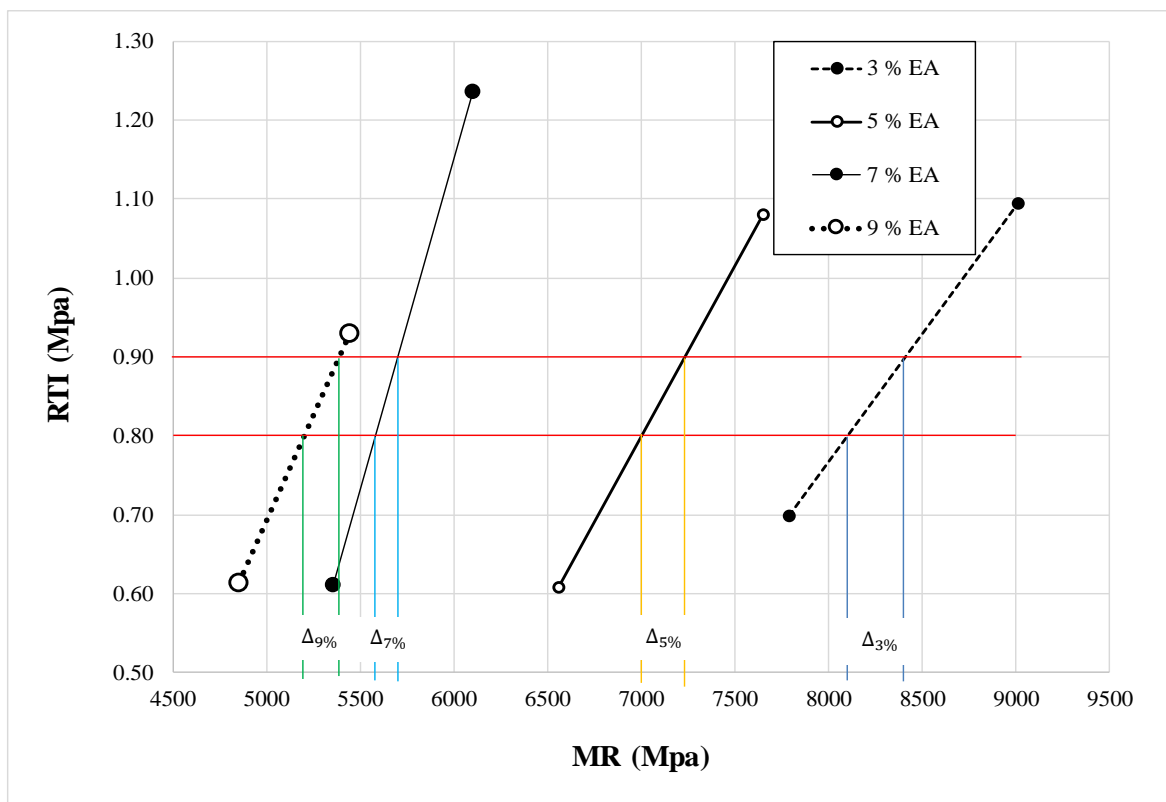
$$m_{9\%} = \frac{0,93 - 0,61}{5445 - 4850}$$

$$m_{9\%} = \frac{0,32}{595}$$

$$m_{9\%} = 5,4 * 10^{-4}$$

Analizando los resultados de las pendientes halladas de cada una de las rectas, se confirma que cuando la recta disminuye su pendiente la mezcla aumenta su Módulo Resiliente (MR), lo que hace que esta aumente su rigidez y se comporte de manera más frágil lo que puede causar que la mezcla pueda sufrir deterioros por fatiga como son la piel de cocodrilo, fisuras longitudinales, bacheos y parcheos. De igual manera a medida que la pendiente aumenta, la mezcla se comporta de forma dúctil y se sustentanta el análisis realizado a la mezcla con contenido de emulsión asfáltica del 7 por ciento realizada anteriormente.

Continuando con el análisis de la Figura 10 también se puede evidenciar que para una variación determinada de la Resistencia a la Tracción Indirecta el  $\Delta MR$  es diferente, tendiendo a aumentar de acuerdo con la pendiente de la recta como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12. Determinación de la variación del Módulo Resiliente de acuerdo a una variación determinada de la Resistencia a la Tracción Indirecta.**

Tomando como referencia una variación de 0,10 MPa (de 800 kPa a 900 kPa) en la resistencia a la Tracción Indirecta el Módulo Resiliente de cada una de las mezclas, puede estimarse el valor del MR, siendo que esta variación es inversamente proporcional a su pendiente

De esta forma:

Para la mezcla de 3% de emulsión asfáltica:  $\Delta MR$  es de  $\Delta_{3\%} = 312$  MPa

Para la mezcla de 5% de emulsión asfáltica:  $\Delta MR$  es de  $\Delta_{5\%} = 233$  MPa

Para la mezcla de 7% de emulsión asfáltica:  $\Delta MR$  es de  $\Delta_{7\%} = 119$  MPa

Para la mezcla de 9% de emulsión asfáltica:  $\Delta MR$  es de  $\Delta_{9\%} = 185$  MPa

De esta forma se puede evidenciar que las mezclas con bajos contenidos de EA presentan una respuesta mecánica más frágil, contrario a altos contenidos de EA. Esto resulta de

especial interés, dado que no necesariamente incrementos de resistencia conllevan incrementos en la resiliencia de las mezclas. Así, el valor de RTI por sí mismo no podría considerarse un parámetro adecuado de diseño.

Tomando en cuenta estas consideraciones y realizando un análisis de los resultados se espera que una mezcla que presente un equilibrio de variación entre los resultados de la Resistencia a la Tracción Indirecta y la variación de su Modulo Resiliente sería la mejor manera de llegar a una mezcla que pueda funcionar de manera eficiente en el mejoramiento de las vías de bajos volúmenes de tránsito en Colombia. Para el estudio que se está realizando en el presente trabajo sin tener en consideración parámetros establecidos dentro de la Norma INVIAS, la mezcla que tendría un mejor comportamiento frente a las solicitudes de carga sería la mezcla con 3 por ciento de emulsión asfáltica ya que como se muestra en las figuras analizadas esta mezcla presenta un menor valor en la pendiente de la recta de acuerdo con una variación de Resistencia a la Tracción Indirecta que muestra que el Módulo resiliente tiene un  $\Delta$  de variación más alto, lo que indica que la mezcla va a tener una mejor respuesta elástica ante la repetición de cargas o de tráfico.

Realizando el análisis teniendo en cuenta el tiempo de curado de cada una de las mezclas se observa dentro de la gráfica de la Figura 10 que estas mezclas con el tiempo van aumentando la resistencia, pero al mismo tiempo la variación en el aumento del módulo es significativa llegando a módulos tan altos que pueden ser similares a los de mezclas como los concretos hidráulicos.

De acuerdo con la Norma INVIAS en el Artículo 461-13, se tiene que un criterio de aceptación para mezclas fabricadas con EA y Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP) para el mejoramiento de vías, un valor de Resistencia a la Tracción Indirecta mínimo de 2,0 MPa. Realizando la comparación con los valores hallados de las mezclas ensayadas se deduciría que ninguna de las mezclas realizadas cumpliría para ser utilizada en el mejoramiento de las vías de bajos volúmenes de tránsito. No obstante, los valores de MR son superiores a los presentados en mezclas asfálticas convencionales.

## CONCLUSIONES

1. Realizados los diferentes ensayos de caracterización física del material de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), el material cumple con los parámetros establecidos en las especificaciones de la Norma del INVIAS del 2013, mostrando que el material después de ser sometido a la repetición de cargas generadas por un tráfico vehicular y ya teniendo un desgaste considerable este mantiene propiedades físicas adecuadas para poder ser reutilizado en las diferentes propuestas para el mejoramiento de las vías en Colombia.
2. Tomando en cuenta los resultados hallados se evidencia que para una misma variación de la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) se presentan diferentes valores de Módulo Resiliente (MR), y que ambos valores son función del tiempo de curado.
3. Teniendo en cuenta los parámetros establecidos en las especificaciones del INVIAS para mezclas con Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), y el criterio que las mezclas deben tener mínimo un valor de Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) de 2,0 MPa, ninguna de las mezclas realizadas cumple para ser utilizada en el objeto del estudio, toda vez que los valores oscilaron entre 0,61 MPa y 1,09 MPa
4. Teniendo en cuenta los tiempos de curado en seco realizado a las mezclas y con los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica (EA) se evidencia que a medida que transcurre el tiempo estas tienen una tendencia a incrementar la Resistencia a la tracción Indirecta y el Módulo Resiliente. El incremento más acentuado para las mezclas estudiadas fue para el 7 % de EA; que, no obstante, no repercutió en altos incrementos de la capacidad resiliente, es decir, se tornó un material más dúctil.
5. De acuerdo con todo el análisis realizado a las mezclas se puede decir que la Resistencia a la Tracción Indirecta no es un criterio adecuado para el diseño de mezcla con el material de Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP), toda vez que mezclas con iguales incrementos de resistencia pueden tener diferentes respuestas resilientes.

6. Teniendo en cuenta que el módulo resiliente de un concreto asfáltico convencional esta entre 1500 MPa - 3500 MPa y comparando con los resultados obtenidos del ensayo de las mezclas, prácticamente tendrían una mejor capacidad resiliente de las cargas a que puedan ser sometidas en vías de bajos volúmenes de tráfico. Los módulos hallados en cada una de las mezclas realizadas oscilan entre 4000 MPa – 9000 MPa, y se incrementan con la edad de cura, lo que evidencia un comportamiento similar a una base tratada con cemento hidráulico. Por tratarse de una mezcla a ser aplicada en vías de bajos volúmenes de tránsito, en alto módulo tendrá pocas implicaciones en términos de deterioros que puedan afectar el pavimento.
7. Teniendo en consideración los análisis realizados y tomando como concluyente que la Resistencia a la Tracción Indirecta no es un criterio adecuado para el diseño de mezclas con Reciclado de Pavimento Asfáltico (RAP) y bajo el criterio de los valores hallados del Módulo Resiliente se puede definir que las mezcla pueden ser adecuadas para la utilización en el objeto del estudio.
8. Para el caso de la mezcla estudiada, se tienen dos componentes de la respuesta mecánica: por una parte, una fracción dúctil, deformable, debido al contenido de cemento asfáltico remanente del RAP, y de la EA adicionada, mientras que por otro lado se tiene un componente rígido dado por el cemento asfáltico. En cualquier caso, la respuesta mecánica dependerá de ambas fracciones, siendo que el diseño del pavimento debe obedecer a un criterio medio en aras de reducir el riesgo a fallas por deformación permanente o por fatiga. Ante esto, la relación RTI/MR constituyen una primera aproximación a tal indicador.
9. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de Módulo Resiliente (MR) y un comparativo con la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI), la mezcla que mejor comportamiento muestra frente a los resultados hallados es la mezcla con contenido de emulsión asfáltica de 3 por ciento, ya que esta muestra una mayor variación en el aumento del Módulo Resiliente con el tiempo.

10. Se propone una metodología de dosificación de 100 por ciento de RAP con un porcentaje constante de cemento hidráulico del 12,5 por ciento, y 3 por ciento de emulsión asfáltica, siendo éste el porcentaje óptimo que satisface los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la tracción indirecta y de módulo resiliente.
11. Resulta válido indicar que para efectos de diseño, es adecuado establecer parámetros que correlacionen tanto la resistencia como la respuesta resiliente, dado que no necesariamente ambos se encuentran directamente relacionados, especialmente en la investigación de nuevos materiales.
12. Las mezclas realizadas con los diferentes porcentajes de emulsión asfáltica para este proyecto muestran que es una alternativa efectiva ya que se puede realizar la mezcla insitu y no requiere de temperaturas que afecten su instalación.

## REFERENCIAS

- [1] E. Correa Valderrama, “el rol de las vías terciarias en la construcción de un nuevo país”, Revista de Ingeniería, n° 45, pp. 64-71, 2017.
- [2] D. Zaninovich, “vías regionales y la necesidad de una gestión compartida. Dimitri Zaninovich”, Revista de Ingeniería, n° 45, pp. 72-79, 2017.
- [3] M. THYNELL, “Roads to equal access: the role of transport in transforming mobility”, Asia, 2017.
- [4] M. NASIR, Et al. “An overview of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in warm mix asphalt using foaming technology”, Malaysia, 2016.
- [5] F. Miranda and J. P. Aguiar, "Mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados", 2019.
- [6] W. MOLINA, Et al. “Concreto reciclado: una revisión”, Revista ALCONPAT. Mérida, México, Dic, 2015.
- [7] P. ROMERO, “Análisis de la experiencia colombiana en reciclaje en frío de pavimentos asfálticos y formulación de una guía de intervención”, Trabajo de grado para optar por el título de magíster en ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, 2011.
- [8] J. CASTELLANOS y R. SOCHA, “Evaluación del comportamiento mecánico en pavimentos de espesor completo de asfalto reciclado (RAP) estabilizado con emulsión asfáltica y adición de cemento portland tipo I, sin intervención de la subrasante”, Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil, Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, 2017.
- [9] M. E. VILLALTA y R. J. FIGUEROA, “Comparativa entre el módulo de resiliencia y el módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente diseñadas por el método marshall en el salvador, Centroamérica”, Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil, Universidad de El Salvador, Santa Ana, El Salvador, 2017.
- [10] O. F. Ramos, “diseño de una mezcla asfáltica de alto desempeño utilizando materiales de pavimento asfáltico recuperado (RAP)”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro México, 2017.

- [11] F. Miranda, J. P. Aguiar, “mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados”, Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR, Volumen 10, N.º1, Enero 2019.
- [12] H. RESTREPO y S. STEPHENS, “Reciclaje de pavimentos. Estudio de las ventajas económicas del reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos”, Monografía para optar por el título de especialista en vías y transporte, Universidad de Medellín, Medellin, Colombia, 2015.
- [13] M. ALVARADO y A. AYALA, “Seminario de profundización reciclaje pavimentos flexible: estudio de mezclas asfálticas recicladas modificadas con diferentes porcentajes de WEO (WA)”, Facultad de ingenierías, Programa ingeniería civil, Universidad cooperativa de colombia, Ibagué tolima, Colombia, 2019.
- [14] INVIAS, “Reciclado del pavimento, una técnica viable y económica para las vías”, 2012.
- [15,16] A. CASTRO, “Investigación sobre mezclas asfálticas en frío 100 por ciento recicladas con adición de residuos sólidos”, Tesis de grado para optar por el título de magister en ingeniería civil, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2018.
- [17] Normas de ensayo de materiales. Instituto Nacional de Vias, INVIAS, Colombia, 2013.



**ANEXO 1 RESULTADOS ENSAYO RESISTENCIA A LA  
TRACCION INDIRECTA (RTI).**

## **ANEXO 2 RESULTADOS ENSAYO MODULO RESILIENTE MR A LOS 14 DIAS**

## **ANEXO 2 RESULTADOS ENSAYO MODULO RESILIENTE MR A LOS 28 DIAS**